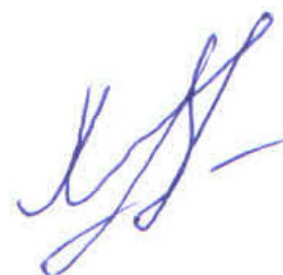


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

На правах рукописи

Ханнанов Рустем Рашитович



Разработка методики геодезического мониторинга
ограждающих дамб (на примере золоотвала ТОО «Главная распределительная
энергостанция Топар»)

1.6.22. Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор
Шоломицкий Андрей Аркадьевич

Новосибирск – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ОБЗОР ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА НАСЫПНЫХ СООРУЖЕНИЙ	9
1.1 Общие сведения о насыпных сооружениях	12
1.2 Методы точечного геодезического мониторинга состояния насыпных дамб и плотин.....	15
1.2.1 Геодезический мониторинг состояния насыпных плотин и дамб с применением роботизированных тахеометров.....	15
1.2.2 Методика инструментального контроля за насыпными дамбами и плотинами с использованием GNSS-технологий.....	17
1.3 Методы площадного мониторинга состояния дамб и плотин.....	18
1.3.1 Трехмерное лазерное сканирование при мониторинге гидротехнических сооружений	18
1.3.2 Применение мониторинговой системы InSAR.....	23
Выводы по первому разделу	25
2 МЕТОДИКА НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ ЛАЗЕРНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ	27
2.1 Объект исследования.....	27
2.2 Разработка проекта геодезического мониторинга ограждающей дамбы № 1 золоотвала ТОО «Главная распределительная энергостанция Топар»	29
2.3 Методика наземного лазерного сканирования и оценка точности результатов	33
2.4 Оценка точности результатов наземного лазерного сканирования ограждающей дамбы № 1 в системе точечного мониторинга	38
2.5 Сравнительный анализ площадных моделей участка дамбы № 1 золоотвала.....	41
2.6 Анализ однородных областей поверхностей	60
2.7 Выводы по второму разделу	65

3 УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МЕТОДИКА ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА.....	67
3.1 Геотомографические исследования тела дамбы № 1	67
3.2 Обследование гидротехнических сооружений методом аэрофотосъемки	72
3.3 Фильтрационные расчеты и расчет устойчивости сооружения по трехмерной модели дамбы.....	75
3.4 Этапы методики геодезического мониторинга.....	90
3.5 Структура базы данных программного комплекса Dam deformation	92
3.6 Выводы по третьему разделу	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	98
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	100
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСА ДАМБЫ МЕТОДОМ КРУГЛОЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ.....	113
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ И СТЕПЕНИ НАСЫЩЕНИЯ ВОДОЙ ТЕЛА ДАМБЫ.....	115
ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) СТРУКТУРНОЕ СТРОЕНИЕ ДАМБЫ И ОСНОВАНИЯ	120
ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное) ЭФФЕКТИВНЫЕ ОБЩИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ОБЪЕКТА И МАССИВА	121

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Гидротехнические сооружения являются важными инженерными сооружениями, поэтому аварии (прорывы плотин или ограждающих дамб хвостохранилищ) приводят к катастрофическим последствиям с нанесением ущерба предприятиям, сельскому хозяйству, дорожному, жилищно-коммунальному хозяйству и населению. Одним из таких примеров является крупнейшая авария, связанная с прорывом ограждающей дамбы хвостохранилища на железнорудной шахте в бразильском городе Брумадинью. Из-за повреждения дамбы хвостохранилища поток грязи объемом 12 миллионов кубометров обрушился на долину, сметая все на своем пути. Помимо смертей и разрушений, трагедия значительно ухудшила экологическую обстановку в регионе. Трагедию в Брумадинью называют самой страшной экологической катастрофой за всю историю Бразилии и самой масштабной в мире из связанных с обрушением дамб хвостохранилищ. Эта авария является примером, который показывает, что чрезвычайные ситуации такого характера и такого масштаба могут оказать глобальное катастрофическое влияние.

Также не стоит забывать о том, что и на территории постсоветского пространства происходили прорывы подобного характера, последствия которых были ужасающими: уничтоженные жилые и административные здания, размытые дороги, повреждённые линии связи и электропередачи, затопленные техника и транспорт. Но самое страшное и непоправимое – погибли люди. Примером этому являются прорыв дамбы на реке Сейба (Россия) 19 октября 2019 г., прорыв дамбы пруда-отстойника хвостохранилища в поселке Кокпекты (Казахстан) 31 марта 2014 г., прорыв дамбы Сардобинского водохранилища (Узбекистан) 1 мая 2017 г.

В связи с этим гидротехнические сооружения как объекты стратегической важности подвергаются периодическому (не реже одного раза в пять лет) комплексному мониторингу, в том числе геодезическому [46, 51].

Проведение геодезических наблюдений в системе мониторинга безопасности ограждающих гидротехнических сооружений позволяет своевременно выявить

возникшие деформации, оценить устойчивость дамб и разработать мероприятия для предотвращения аварийных ситуаций.

Сохранение эксплуатационной прочности ограждающих дамб и плотин при увеличении приемной способности существующих гидротехнических сооружений является актуальной проблемой для обеспечения безопасности прилегающих территорий.

Степень разработанности темы диссертационной работы определяется исследованием научных публикаций и трудов в области прикладной геодезии применительно к задачам геодезического мониторинга и наблюдения за смещениями и деформациями гидротехнических сооружений насыпного типа. В процессе работы над диссертацией использовались труды известных ученых в области прикладной геодезии: Бесимбаевой О. Г., Брыня М. Я., Гура Д. А., Карпика А. П., Комиссарова А. В., Мелкого В. А., Могильного С. Г., Мустафина М. Г., Пимшина Ю. И., Уставича Г. А., Устинова А. В., Хмыровой Е. Н., Хорошилова В. С., Чугаева Р. Р., Шоломицкого А. А., Шульца Р. В., Ямбаева Х. К., Centolanza G., Di Martire D., Iglesias R., Monells D., Sica S. и многих других.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является разработка методики геодезического мониторинга состояния ограждающих гидротехнических сооружений с применением технологии наземного лазерного сканирования на примере золоотвала ТОО «Главная распределительная энергостанция Топар».

Основные задачи исследований:

- выполнить анализ существующих методов геодезического мониторинга гидротехнических сооружений и соответствующей научно-технической и нормативной документации;
- выполнить экспериментальное апробирование применения технологии лазерного сканирования дамбы золоотвала с подбором параметров фильтрации для эффективного удаления растительности из точек лазерных отражений (ТЛО) и исследовать точность определения параметров этого инженерного сооружения;

– методом конечных элементов выполнить 3D-моделирование тела дамбы для определения коэффициента запаса устойчивости и определить меру влияния процессов фильтрации на напряженно-деформированное состояние данного инженерного сооружения;

– разработать структуру базы данных для хранения комплексной информации о результатах 3D-моделирования тела дамбы и параметрах ее деформированного состояния;

– выполнить апробацию разработанной методики на примере геодезического мониторинга насыпных дамб золоотвала ТОО «Главная распределительная энергостанция Топар».

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются насыпные дамбы и плотины шлакоотстойников.

Предмет исследования – методика геодезического мониторинга технического состояния насыпных гидротехнических сооружений с применением технологии наземного лазерного сканирования.

Научная новизна исследования заключается в следующем.

1 Предложен алгоритм обработки результатов лазерного сканирования с определением параметров фильтрации методом молдинга для классификации растительности и ее удаления из точек лазерных отражений для выявления расположения деформированных участков и вычисления величин деформаций.

2 Предложено технологическое решение по выделению потенциально опасных участков в результате томографического исследования тела дамбы и конечно-элементного моделирования этих областей для определения критерия устойчивости.

3 Предложена структура базы данных для хранения комплексной информации о всех видах обследования и мониторинга дамбы, для комплексного использования при определении условий безопасного функционирования этого сооружения.

Теоретическая значимость. Предложено при обработке результатов лазерного сканирования использовать фильтрацию методом молдинга для удаления растительности из точек лазерных отражений для анализа поверхности тела дамбы

с выделением областей деформаций и конечно-элементное моделирование для вычисления критерия устойчивости этого инженерного сооружения.

Практическая значимость. Разработанная методика обеспечивает возможность осуществлять геодезический мониторинг гидротехнических сооружений с определением критерия устойчивости и условий их безопасного функционирования.

Методология и методы исследования. Методологической базой исследования являются: теория математической обработки геодезических измерений, методы дискретной математики, методы статистического и сравнительного анализа, методы фильтрации пространственных данных, метод конечных элементов, геомеханические методы расчета устойчивости.

Положения, выносимые на защиту:

1 Предложенная технология лазерного сканирования и обработки с подбором параметров фильтрации методом молдинга для исключения растительности из точек лазерных отражений позволяет на поверхности дамбы выявить расположение деформированных участков с определением величин деформаций.

2 Разработанная методика геодезического мониторинга насыпных гидротехнических сооружений на базе технологии лазерного сканирования, включающая томографические исследования тела дамбы и конечно-элементное моделирование, позволяет определять напряженно-деформированное состояние данного гидротехнического сооружения.

3 Предложенная структура базы данных для хранения комплексной информации о всех видах обследования дамбы позволяет сделать заключение об устойчивости инженерного сооружения и условиях его безопасного функционирования.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Тематика диссертации соответствует следующим областям исследований: 10 – Дистанционный геодезический мониторинг состояния окружающей среды, в первую очередь, опасных процессов и явлений, способствующих возникновению стихийных бедствий и кризисных ситуаций, в том числе путем создания сетей непрерывных и повторных наземных, морских и спутниковых наблюдений; 12 – Геодезическое обеспечение изысканий, проек-

тирования, строительства и эксплуатации крупных инженерных комплексов, в том числе гидротехнических сооружений, атомных и тепловых электростанций, промышленных предприятий, линейных сооружений, в том числе с применением робототехники. Геодезический мониторинг устойчивости зданий и сооружений. Геодезический контроль ведения технического надзора при строительстве и эксплуатации нефтегазодобывающих комплексов паспорта научной специальности 1.6.22. Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России по техническим наукам.

Степень достоверности и апробация полученных результатов. Апробация результатов исследований проходила на международных конференциях: Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (2019, 2022 и 2023 гг., СГУГиТ, г. Новосибирск); Международном маркшейдерском форуме «Геопро странственная цифровая инженерия в геодезии, маркшейдерии и геомеханике» (2023 г., КарТУ им. А. Сагинова, г. Караганда), Всероссийской научной конференции с международным участием «Геодинамика и напряженное состояние недр земли» (2023 г., ИГД СО РАН, г. Новосибирск).

Результаты исследования внедрены в производственный процесс ТОО «Главная распределительная энергостанция Топар», ТОО «Оркен», АО «Качары руда».

Публикации по теме диссертации. Основные положения и результаты исследований отражены в 14 научных работах, 3 из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 121 страницу машинописного текста. Диссертация состоит из введения, 3 разделов, заключения, списка литературы, включающего 99 наименований, содержит 4 таблицы, 51 рисунок, 4 приложения.

1 ОБЗОР ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА НАСЫПНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Сохранение эксплуатационной прочности и надежности насыпных дамб и плотин всегда являлось и является актуальной проблемой с точки зрения обеспечения безопасности района расположения гидротехнического сооружения [7]. Вопрос безопасности гидротехнических сооружений является актуальным для всех стран мира в связи с потенциальной опасностью возникновения крупных аварий и техногенных чрезвычайных ситуаций [7, 32].

Так, 25 января 2019 г. в пригороде Брумадинью бразильского штата Минас-Жерайс произошел прорыв дамбы: из-за повреждения хвостохранилища поток грязи объемом 12 миллионов кубометров обрушился на долину, сметая все на своем пути. Погибли люди, уничтожены дома и целые поселения. Помимо человеческих жертв и разрушений, произошло значительное ухудшение экологической обстановки в регионе. Токсичные отходы полностью нарушили экосистему реки Параопеба, сделали непригодной для питья воду, убили сотни животных. Эту трагедию называют самой страшной экологической катастрофой за всю историю Бразилии и самой масштабной в мире из прорывов дамб хвостохранилищ. И это далеко не единственный случай прорыва гидротехнических сооружений. 19 октября 2019 г. около 02:00 по московскому времени на реке Сейба в Красноярском крае разрушилась дамба технологического водоема золотодобывающей артели. Инцидент произошел в районе поселка Щетинкино Курагинского района. Хлынувшая вода затопила в поселке два рабочих общежития временного типа. По имеющимся данным, погибли 15 человек. В 2014 г. прорвало плотину на Кокпектинском водохранилище в Карагандинской области (Казахстан). Это повлекло за собой ужасающие последствия: множество пострадавших среди жителей поселка Кокпекты, уничтоженные жилые и административные здания, размытые дороги, повреждённые линии связи и электропередачи, затопленные техника и транспорт, огромные потери голов скота. Но произошло самое страшное и непоправимое – погибли люди.

Безопасность гидротехнических сооружений зависит от правильного проектирования, строительства и мониторинга фактического поведения объекта во время строительства и эксплуатации.

Земляные насыпные дамбы (рисунок 1.1) различаются по конструктивным признакам, могут иметь протяженность от нескольких сотен метров до нескольких километров [53].



Рисунок 1.1 – Земляная насыпная дамба

Устойчивость дамб (плотин) определяется совокупностью инженерно-геологических, гидрогеологических и техногенных факторов, из которых наибольшее влияние оказывают физико-механические характеристики грунтов и хвостов; технология возведения и эксплуатации сооружения; топография основания; гидродинамические, гидростатические, сейсмические и динамические силы [7].

Для обеспечения нормальной эксплуатации гидротехнических сооружений производится комплексное обследование, по результатам которого выполняют оценку технического состояния объекта наблюдения [32]. При производстве мониторинга определяют основные факторы, которые оказывают отрицательное влияние на устойчивость дамб и плотин [54].

В общем комплексе обследования гидротехнических сооружений важная роль отводится геодезическим методам наблюдений. Измеряемые с их помощью вертикальные (осадки) и горизонтальные смещения позволяют [16]:

- 1) определить состояние дамбы (плотины) и ее основания в процессе строительства, что может способствовать корректировке методов производства работ;
- 2) выявить степень деформации гидротехнического сооружения и его основания во время эксплуатации для оценки устойчивости и принятия своевременных профилактических мероприятий;
- 3) контролировать проектные параметры в периоды строительства и эксплуатации.

Геодезический мониторинг является важным компонентом системы технического контроля инженерных сооружений, которая обеспечивает надежность гидротехнических сооружений.

К основным факторам, которые могут привести к разрушению гидротехнических сооружений, относятся природные явления (землетрясения, оползни, обвалы и т. д.), техногенные факторы, нарушение правил эксплуатации, воздействие паводков, разрушение структуры основания дамб [43, 72]. Геодезические наблюдения, которые выполняются с применением современных геодезических приборов, позволяют на ранних стадиях выявить процесс деформирования и предотвратить возникновение аварийных ситуаций.

Несмотря на существование множества методов геодезического мониторинга за инженерными сооружениями, необходимо усовершенствовать их и разрабатывать новые методы в связи с развитием техники и технологии.

Целью геодезического мониторинга является контроль геометрических параметров гидротехнических сооружений, а также оценка их соответствия проекту. В результате проведения геодезического обследования должны быть получены

данные по деформациям сооружения в виде сводных ведомостей и графических материалов (планов, схем) [22].

1.1 Общие сведения о насыпных сооружениях

Гидротехнические сооружения по своему целевому назначению делятся на следующие виды:

- водоподпорные, создающие подпор воды, например, в русле реки, а также плотины и некоторые дамбы, работающие как плотины;
- водопроводящие, т. е. искусственные русла (каналы, туннели, лотки, трубопроводы);
- регуляционные, устраиваемые с целью регулирования режима водного потока, защиты дна и его берегов от размыва и т. п. [30]

Гидротехнические сооружения имеют ряд особенностей, поэтому они значительно отличаются от других инженерных сооружений, их размеры, компоновка, типы отдельных частей существенно зависят от местных условий: топографии местности, гидрогеологических условий, геологического строения основания и т. п.

По материалу, из которого возводится тело плотины или дамбы, различают гидротехнические сооружения из грунтового материала, бетона и железобетона.

Плотины или дамбы из грунтовых материалов, в зависимости от материала их тел и противофильтрационных устройств, а также способов возведения, подразделяют на основные типы, указанные в таблице 1.1 [47, 50].

Таблица 1.1 – Типы дамб (плотин) из грунтовых материалов

Тип плотины	Отличительные признаки
Земляная насыпная	Грунты от глинистых до гравийно-галечниковых; отсыпают насухо с уплотнением или в воду
Земляная намывная	Грунты от глинистых до гравийно-галечниковых; намывают средствами гидромеханизации
Каменно-земляная	Грунты тела – крупнообломочные; противофильтрационных устройств – от глинистых до мелкопесчаных
Каменно-набросная	Грунты тела – крупнообломочные; противофильтрационные устройства – из негрунтовых материалов

Объектами исследования являются земляные насыпные дамбы и плотины, которые по конструктивным признакам различаются на следующие основные типы [66] (рисунок 1.2):

1) плотины из однородного грунта, т. е. выполненные из одного вида слабопроницаемого грунта (рисунок 1.2, *а*);

2) плотины из неоднородного грунта; часто отдельные грунты в теле плотины располагают так, чтобы водопроницаемость плотины увеличивалась по направлению от верхнего бьефа к нижнему (рисунок 1.2, *б*), иногда наиболее водопроницаемый грунт помещают в центральной части профиля плотины (рисунок 1.2, *в*);

3) плотины с наружной (верховой) маловодопроницаемой или водонепроницаемой противofiltrационной преградой в виде экрана, выполненного из маловодопроницаемого грунта (рисунок 1.2, *г, е*), асфальтобетона, полиэтиленовой пленки и т. п. (рисунок 1.2, *д*);

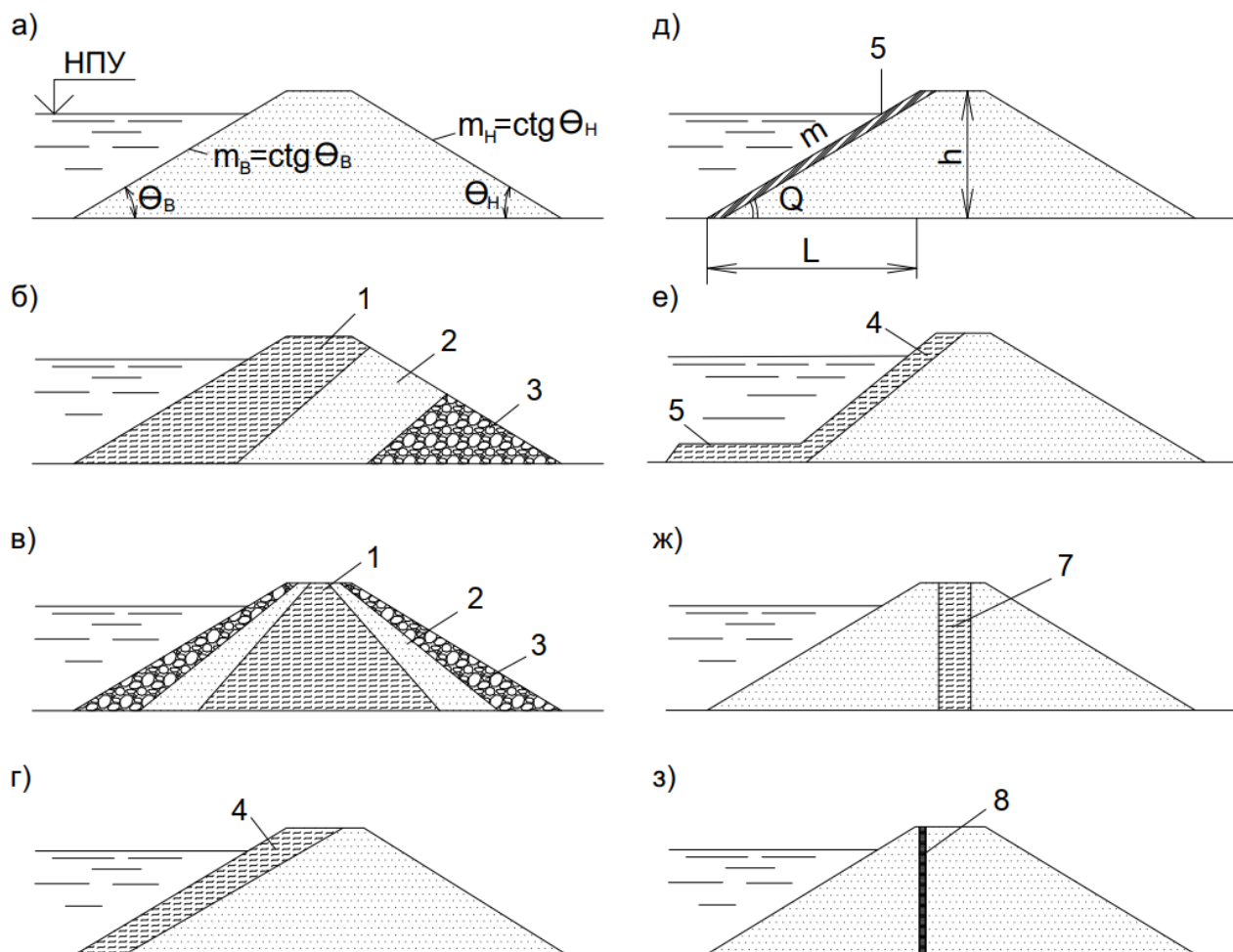
4) плотины с внутренней (центральной) маловодопроницаемой или водонепроницаемой преградой в виде ядра, образованного маловодопроницаемым грунтом (рисунок 1.2, *ж*), или диафрагмы (рисунок 1.2, *з*) из негрунтовых материалов: бетона, железобетона, асфальтобетона, полиэтиленовой пленки, металла и т. п.

В зависимости от способа производства работ, различают земляные насыпные дамбы и плотины:

1) уплотняемые механическими средствами без применения отсыпки грунта в воду («сухой способ»);

2) возводимые путем отсыпки грунта в воду (также в некоторой мере уплотняемые механическими средствами).

В зависимости от грунтов, которые можно добыть на месте, а также от геологического строения основания и т. п., наиболее рациональным в техническом и экономическом отношениях может оказаться любой из перечисленных выше типов дамб и плотин.



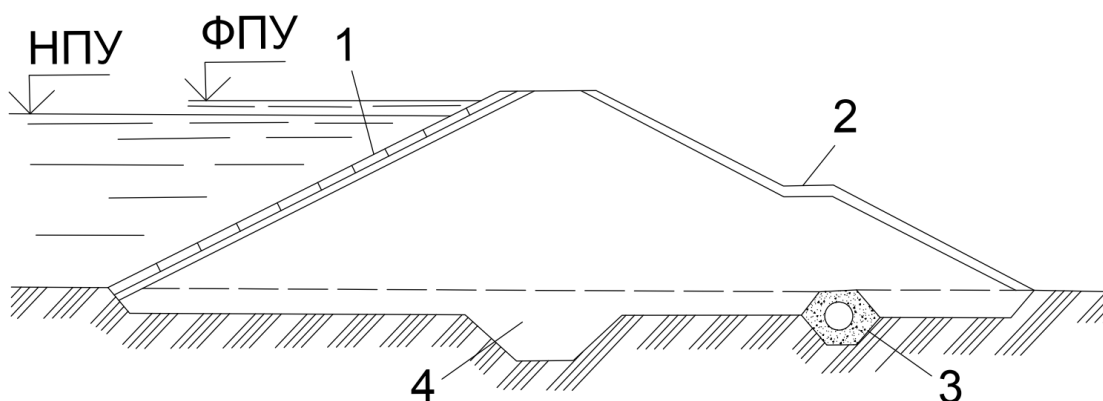
1 – суглинок; 2 – песок; 3 – гравий; 4 – экран грунтовый; 5 – экран из негрунтового материала; 6 – понур; 7 – ядро; 8 – диафрагма

Рисунок 1.2 – Основные типы земляных насыпных дамб и плотин

Земляные плотины имеют трапецидальное поперечное сечение (рисунок 1.3). Гребень глухой земляной плотины намечают так, чтобы он возвышался над нормальным подпорным уровнем (НПУ) и форсированным подпорным уровнем (ФПУ) на высоту, несколько большую высоты наката ветровой волны на верховой откос плотины. Ширина плотины поверху задается такой, чтобы на ее гребне можно было разместить проезжую дорогу [11, 19, 21, 34, 35, 38].

Для защиты откосов дамбы или плотины от размыва волнами, течением воды в бьефе, а также стекающей по ним дождевой водой их обычно покрывают, например, бетонными плитами, каменной наброской и т. п. На откосах иногда делают бермы. Поверхностный слой земли в пределах основания дамбы (плотины) сни-

мают; часто в основании дамбы (плотины) устраивают так называемые зубья, которые прорезают грунт основания на некоторую глубину. В пределах низового клина плотины, как правило, устраивают дренаж для перехвата воды, фильтрующейся через тело дамбы (плотины).



1 – покрытие откоса (крепление); 2 – берма; 3 – дренаж; 4 – зуб

Рисунок 1.3 – Поперечное сечение земляной плотины

1.2 Методы точечного геодезического мониторинга состояния насыпных дамб и плотин

1.2.1 Геодезический мониторинг состояния насыпных плотин и дамб с применением роботизированных тахеометров

Являясь одной из важнейших инженерных инфраструктур, насыпные плотины и дамбы играют важную роль в предотвращении наводнений, производстве электроэнергии и орошении [82]. Нельзя игнорировать безопасность при эксплуатации дамб, потому что в случае чрезвычайных ситуаций они будут иметь разрушительные последствия для людей, зданий, сооружений и окружающей среды. Мониторинг необходим для непрерывного контроля состояния плотин и дамб [91]. Геодезический мониторинг производят на протяжении всего периода эксплуатации гидротехнического сооружения. На этапе проектирования производ-

ства геодезического мониторинга разрабатывается общий план системы наблюдений с перечнем и расположением станций приборов, контрольных и наблюдательных точек.

Тахеометр является одним из наиболее распространенных геодезических приборов и играет важную роль в производстве геодезического мониторинга. Он широко используется для геодезических наблюдений за зданиями и инженерными сооружениями. Появление роботизированных тахеометров привело к повышению надежности и автоматизации мониторинга [78, 94, 98].

Для системы непрерывного автоматического геодезического мониторинга за плотинами и дамбами, основанной на применении роботизированных тахеометров, главной задачей является обнаружение смещений тела насыпного сооружения, а также определение состояния целостности плотины, её основания и прилегающей территории.

На рисунке 1.4 показана система автоматического мониторинга плотины [98].



Рисунок 1.4 – Система автоматического мониторинга на основе роботизированных тахеометров

Погодные условия являются важным фактором, который следует учитывать при мониторинге деформаций плотин. Во-первых, длительный солнечный свет, дождь и снег могут привести к коррозии тахеометра, если установка находится на открытом воздухе. Поэтому необходимо построить смотровую комнату и установить в ней тахеометр. Комната наблюдения предназначена только для тахеометра и комплектующего оборудования, выполняющих наблюдения с заданной частотой измерений. Это защищает прибор от суровых погодных условий и диких животных. Наблюдательный пункт должен быть оснащен метеорологическими датчиками, которые можно использовать для получения данных в режиме реального времени не только для корректировки наблюдений, но и для определения того, подходят ли погодные условия для проведения наблюдений.

Кроме того, автоматическая система мониторинга должна быть оснащена системами видеонаблюдения и сигнализацией в целях обеспечения безопасности приборов. Стационарные призмы должны быть экранированы, чтобы обеспечить долгосрочное использование в качестве наблюдательных точек.

1.2.2 Методика инструментального контроля за насыпными дамбами и плотинами с использованием GNSS-технологий

Методы, основанные на GNSS-технологии, можно рассматривать как консолидированный подход к получению точных смещений в контрольных точках на гидротехнических сооружениях и вокруг них [55].

Данная методика геодезических измерений позволяет изменить требования к традиционной (классической) конструкции наблюдательных станций, т. е. станций с опорными реперами, вынесенными за границу возможного влияния деформаций основания либо тела насыпной дамбы (на расстояние не менее $1,5h$ от подошвы низового откоса, где h – высота дамбы в метрах).

Наблюдательные станции, на которых производятся геодезические измерения с использованием GNSS-технологий, могут состоять из множества реперов, не связанных между собой в профильные линии. При этом анализ результатов измерений производится путем определения вектора смещения каждого репера.

При активной стадии деформаций тела насыпного сооружения применение предлагаемой методики измерений позволяет в режиме реального времени получить полную картину смещений и своевременно разработать мероприятия по обеспечению устойчивости гидротехнических сооружений.

1.3 Методы площадного мониторинга состояния дамб и плотин

В последние годы были апробированы и внедрены в практику новые технологии для определения деформаций дамб и плотин. Такие новые решения начали предлагать возможности для управления безопасностью и структурного анализа. Методы площадного мониторинга дают возможность расширить наблюдаемую область до участка сооружения, а не в виде контрольных точек.

1.3.1 Трехмерное лазерное сканирование при мониторинге гидротехнических сооружений

Наземные лазерные сканеры (НЛС) работают по одному из трех принципов: триангуляция, сравнение времени прохождения импульса или длины волны и разницы фаз. Сканеры, использующие принцип времени прохождения импульса, больше подходят для инженерных задач и мониторинга. Они могут измерять от 10 000 точек в секунду с точностью около 6 мм в зависимости от расстояния, отражающей поверхности и оборудования [85]. Измеряя время между излучением импульса лазерного сигнала и обнаружением отраженного сигнала, можно рассчитать расстояние между оборудованием и объектом, который отразил его излучение. Лазерный луч постепенно отклоняется в двух перпендикулярных плоскостях.

Оба угла отклонения и соответствующее расстояние обеспечат набор сферических полярных координат, которые могут быть преобразованы в инструментальный набор декартовых координат. Каждая станция сканирования обеспечивает плотные точки лазерных отражений, привязанных к их соответствующей

независимой системе координат. При возникновении препятствий обычно требуется сканирование с разных позиций, и для того, чтобы получить полную модель исследуемого объекта, необходимо объединить несколько групп ТЛО в одну. Поскольку каждая группа ТЛО ориентирована в независимой системе координат, необходимо найти параметры трехмерного преобразования, связывающие каждую независимую систему отсчета с общей, предпочтительно декартовой системой (XYZ), связанной с объектом. Используя методы сопоставления форм [90, 92], можно найти параметры преобразования среди множества ТЛО, если они имеют достаточное перекрытие между группами ТЛО. Однако для преобразования данных в известную единую систему необходима идентификация контрольных точек и оценка параметров преобразования [85]. На этапе сканирования получается уникальный массив точек, состоящий из очень плотного набора ТЛО, привязанных к системе координат и охватывающих исследуемый объект. Это числовое представление поверхности объекта, хотя и дискретное по своей природе, можно считать наилучшим решением для любого практического применения при условии достаточно высокого пространственного разрешения. Относительно недавно некоторые НЛС получили собственные возможности привязки. С другой стороны, некоторые исследования проводятся с целью уменьшения их инструментальных ошибок [79].

Иногда наземное лазерное сканирование комбинируют с другими методами сбора пространственных данных. Так, в марте 2003 г. было проведено комбинированное лазерное сканирование и фотограмметрическое обследование плотины Лапао в Португалии. Лазерный сканер Riegl Z360 и цифровая камера Nikon D100 с объективом 20 мм использовались совместно с программным обеспечением RiscanPro для управления объединенной системой и предварительной обработки данных на месте. Общий рабочий процесс состоит в сборе данных как точек лазерных отражений, так и изображений, с разных станций и позиций, чтобы получить полный охват исследуемого объекта. Данные, полученные сканером в зависимости от ориентирования и местонахождения прибора, привязаны к нескольким произ-

вольным инструментальным системам координат и должны быть преобразованы в общую систему отсчета, связанную с объектом. Это достигается тем, что группы ТЛО интегрируются между собой по набору хорошо распределенных контрольных точек, снабженных светоотражателями и в единой системе координат, определенные высокоточными традиционными геодезическими методами. Точки привязки, измеряемые только системой сканирования, используются для усиления геометрии объединения групп ТЛО. Обычно предварительная обработка данных выполняется для того, чтобы гарантировать их качество. В 2003 г. требовалось 4 станции сканирования и использовался 21 отражатель (рисунок 1.5), 9 из них в качестве контрольных точек и 12 в качестве наблюдательных точек.



Рисунок 1.5 – Светоотражающие мишени (отражатели)

В 2005 г. была обследована большая площадь, при этом было установлено 7 сканирующих станций с использованием 15 светоотражающих марок, 7 контрольных точек и 8 наблюдательных точек. В течение следующего периода наблюдений (июль 2007 г.) 3 станции сканирования были нацелены в общей сложности на 27 марок, включая 18 марок на гребне дамбы. Пять из этих марок (MS05, MS06, MS08, MS11 и MS13) использовались в качестве наблюдательных точек, а остальные 13 использовались в качестве точек привязки для объединения групп ТЛО.

Остальные точки использовались также в качестве связующих точек для усиления геометрии опорной сети марок, используемых для регистрации сканов (групп ТЛО).

На рисунке 1.6 показана конфигурация сети, включая станции сканирования, контрольные и наблюдательные марки, а также объединение сканов в единую систему координат.

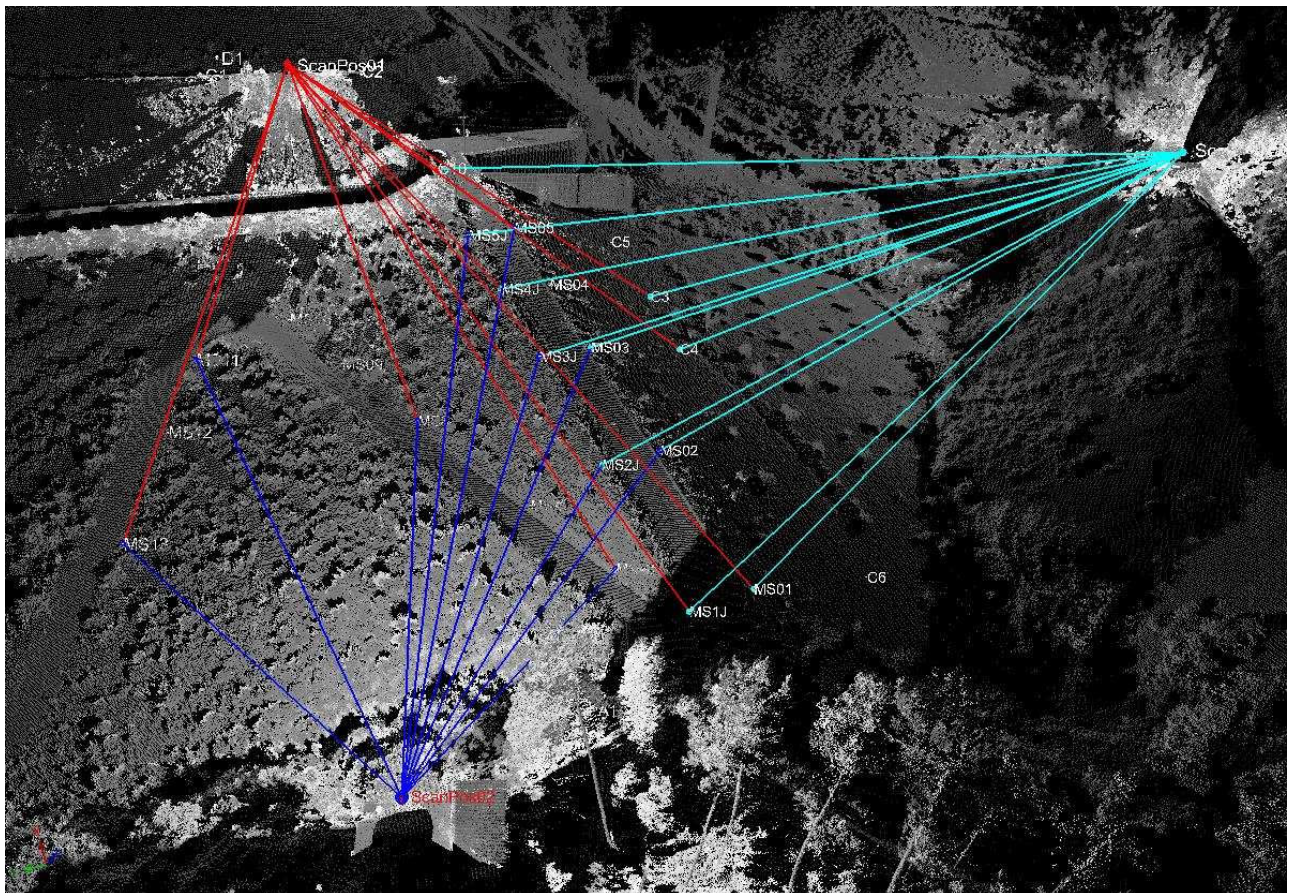


Рисунок 1.6 – ТЛО плотины, показывающее три станции сканирования и комплекс сканерных марок

Изображения были сделаны на каждой станции сканирования с помощью цифровой камеры для получения информации RGB и текстурирования облаков точек, полученных с помощью лазера. Как в 2003, так и в 2007 г. полевые работы, включая определение местоположения марок, 3D-сканирование и получение изображений, занимали 6 часов. В 2005 г. полевые работы занимали 7 часов из-за большей площади обследования и большего количества сканирующих станций.

В том, что касается полученной модели, технология наземного лазерного сканирования получает так называемую цифровую модель поверхности, которая означает, что каждая точка лазерного отражения будет присутствовать в модели (люди, кусты и т. д.). В земляных плотинах растительность является препятствием для исследуемого объекта. С помощью программного обеспечения Riscan Pro сканы были отредактированы вручную, чтобы избавиться от растительности. Полученные ТЛО затем были отфильтрованы по структуре «окто дерева», которая создает кубы заданного размера с одной точкой в центре большего числа усредненных точек. Для создания сетки и изготовления контуров, поперечных сечений и профилей был выбран размер куба 30 см. Эти операции очистки и фильтрации в облаках позволили значительно сократить объем данных. После процедуры фильтрации итоговый массив точек плотины составил около 500 тысяч точек по сравнению с первоначальными 10 миллионами. Поверхности были созданы из точечных данных с использованием процесса 2D-триангуляции Делоне, вычисленного по 2D-координатам вершин, нанесенных на горизонтальную опорную плоскость. В приведенном выше примере результирующая сетка поверхности содержала 945 тысяч треугольников. Далее обрабатываются эти поверхности в различных компьютерных приложениях. Прямое использование ТЛО в программных пакетах CAD, CAE или DTM (Microstation XM) позволяет извлечь поперечные сечения, профили, контуры, 3D-модели для различных инженерных задач, в том числе для геодезического мониторинга. Это возможно сделать с помощью специального подключаемого приложения, которое позволяет обычному программному обеспечению САПР управлять ТЛО. Например, приложения для фотограмметрической обработки, работающие на

программном обеспечении САПР, позволяют векторизировать объекты, используя одновременно точечные данные и ориентированные изображения. После построения трехмерной модели возможно наносить исправленные изображения на поверхности, создавая реалистичные 3D-объекты и окружающую среду.

1.3.2 Применение мониторинговой системы InSAR

Наземные датчики InSAR [87, 89] изначально разрабатывались для измерения горизонтальных смещений основания плотин. В работах [88, 93, 96] сообщается о двух новаторских экспериментальных приложениях, работающих в режимах прерывного и непрерывного сбора данных. Преимущества наземных датчиков InSAR заключаются в плотном пространственном распределении наблюдений (разрешение в субметровых точках) и высокой миллиметровой точности. Эти результаты были получены путем сравнения результатов наблюдений InSAR-датчиков с данными, записанными с помощью обычных частотных датчиков, расположенных внутри тела плотины. Мониторинг с применением датчиков GBSAR (наземные InSAR-датчики) может обеспечить высокое временное разрешение (несколько минут при работе в непрерывном режиме, но с тенденцией к сокращению этого времени в новых датчиках) на рабочих расстояниях до нескольких километров. На сегодняшний день данные датчики используются для наблюдений гидротехнических сооружений на определенный период времени, как дополнительный метод контроля. Это обусловлено стоимостью технологии и сложностью управления приборами. Влияние условий окружающей среды может привести к небольшим ошибкам в некоторых наблюдаемых точках [84]. По этой причине выполненные ранее исследования были направлены на применение корректирующих модулей [99], в то время как методы обработки, которые обычно применяются к спутниковым данным InSAR, такие как интерферометрия с постоянным рассеянием [77], также начали применяться к данным GBSAR.

Космический метод интерферометрии InSAR также возможно применять для измерения просадки грунта на больших площадях или для обнаружения деформа-

ций, связанных со смещением земной поверхности. Он был усовершенствован для анализа небольших участков, таких как неустойчивые склоны насыпных сооружений.

В последнее время, благодаря достижениям в области спутникового мониторинга и анализа территорий земной поверхности, совершенствованию методов обработки, дифференциальные методы интерферометрии InSAR (D-InSAR) расширили свою область применения для измерения деформаций гражданских сооружений. Как и в случае с GBSAR, полноценное использование D-InSAR не может быть внедрено для организации непрерывного мониторинга и заблаговременного предупреждения об аварийных ситуациях. Это обусловлено тем, что все еще слишком много времени требуется для зондирования определенного локального участка местности и обработки данных. Дополнительные причины, которые в настоящее время препятствуют его применению, следует искать в том факте, что наблюдаемые участки структуры необходимо отслеживать в течение длительного времени [97].

В любом случае, D-InSAR широко использовался для измерения деформаций плотин в течение фиксированных периодов времени, для определения горизонтальных и вертикальных смещений на основе архивных данных SAR [80]. Кроме того, те же самые изображения SAR, принятые для измерения деформаций плотины и других гидротехнических сооружений, могут также использоваться для оценки устойчивости склонов на границе водного бассейна [70, 73–76, 86]. Поскольку изображения SAR обычно охватывают обширные области, их рекомендуется использовать, когда объект мониторинга охватывает несколько километров. Это относится к крупным бассейнам, граничащим с коммуникационными коридорами [95]. Также благодаря широкому диапазону возможностей D-InSAR может использоваться для обнаружения оседаний в районах, где расположены плотины, поскольку такие проблемы могут повлиять на устойчивость самих плотин [81].

Полученные на сегодняшний день результаты весьма обнадеживают и открывают широкие перспективы для проведения дальнейших исследований по применению данных SAR, передаваемых из космоса, для измерений деформации плотин.

Действительно, наличие изображений последнего поколения с очень высоким разрешением, полученных с помощью спутниковых созвездий TerraSAR-X, COSMO-SkyMed и SENTINEL, позволит получить лучшие результаты с точки зрения наземного разрешения и сократить время повторного просмотра с помощью алгоритмов, которые дают все более качественные результаты.

Выводы по первому разделу

Обеспечение безопасности и стабильности гидротехнических сооружений является актуальным вопросом в связи с потенциальной опасностью возникновения крупных аварий и техногенных чрезвычайных ситуаций.

Надежное функционирование гидротехнических сооружений обеспечивается, начиная с этапа проектирования, и далее – строительства и эксплуатации сооружения. Работы по мониторингу фактического состояния объекта необходимо проводить на всех этапах строительства и эксплуатации.

Устойчивость дамб (плотин) определяется совокупностью инженерно-геологических, гидрогеологических и техногенных факторов, из которых наибольшее влияние оказывают: физико-механические характеристики грунтов и хвостохранилищ; технология возведения и эксплуатации сооружения; топография основания; гидродинамические, гидростатические, сейсмические и динамические силы, действующие на объект.

В общем комплексе мониторинговых мероприятий гидротехнических сооружений важная роль отводится геодезическим методам наблюдений.

В настоящее время на практике используются различные методы определения деформаций гидротехнических сооружений. Эти методики и технологии можно разделить на две группы: методы точечного геодезического мониторинга и методы площадного геодезического мониторинга. Общая идея, предлагаемая рассмотренными технологиями, заключается в определении и контроле геометрических параметров сооружения. При этом каждый из указанных методов имеет свою специфику и область применения для конкретных условий наблюдений и требований точности.

При мониторинге традиционными точечными геодезическими методами получают результаты измерений лишь в виде дискретных координат определяемых точек, но при этом отсутствуют визуализация и детализация проблемных участков наблюдений и близлежащих участков. Методы площадного мониторинга дают возможность расширить наблюдаемую область до непрерывного участка сооружения, а не в виде контрольных точек.

В настоящей диссертационной работе рассматривается вопрос внедрения и развития площадных методов геодезического мониторинга с применением инновационных технологий и геодезического оборудования.

Одним из популярных направлений площадного мониторинга является внедрение технологии наземного лазерного сканирования. Данная технология позволяет получить детализированные 3D-модели, которые можно использовать для визуализации проблемных участков и для дальнейших расчетов и принятия инженерных решений, обеспечивающих нормальное функционирование объектов мониторинга и снижение рисков возникновения аварийных ситуаций.

Варианты комплектации сканирующей системы: мультистанция (тахеометр и сканирующее устройство) и лазерные сканеры.

Внедрение такой технологии позволит сократить трудовые и временные затраты, а также существенно повысить качество и информативность мониторинговых мероприятий.

Наряду с НЛС, к перспективным площадным методам мониторинга следует отнести аэрофотосъемку с применением БАС и технологии ДЗЗ.

В последнее время, благодаря достижениям в области спутникового мониторинга земной поверхности, совершенствованию методов обработки, дифференциальные методы интерферометрии InSAR (D-InSAR) расширили свою область применения для измерения деформаций земной поверхности и техногенных объектов. Однако для наблюдений за пологими скатами насыпных дамб и плотин методы наземного интерференционного сканирования применять нецелесообразно из-за скользящего луча радара и растительности на поверхности дамбы.

2 МЕТОДИКА НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ ЛАЗЕРНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ

2.1 Объект исследования

Геодезические наблюдения проводились в поселке Топар Абайского района Карагандинской области (Республика Казахстан). Объектом исследования является насыпная дамба № 1 золоотвала ТОО «Главная распределительная энергостанция Топар» (рисунок 2.1), которая отсыпана разнородными грунтами. В зависимости от высоты и типа грунтов основания насыпная дамба № 1 относится ко II классу, так как согласно [31, 49] естественные грунты, слагающие основание, относятся к категориям А, Б, В, а максимальная высота гидротехнического сооружения составляет около 34 м. Давность отсыпки – 48 лет. Насыпные грунты по дамбе № 1 вскрыты скважинами в краевых частях до глубины 3,0–3,9 м. В средней части дамбы до глубины 13,0–19,0 м. В насыпных грунтах встречаются тонкие прослойки песка, включения дресвы и щебня до 18 %, а также мелкие кристаллы гипса. Согласно лабораторным данным, насыпные грунты в теле дамбы относятся к глинам, суглинкам и реже – супесям.

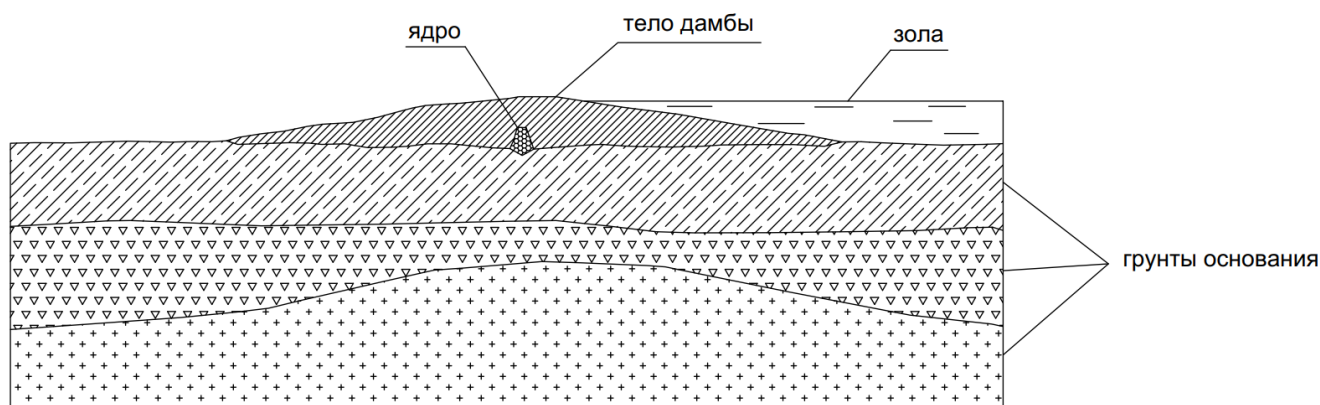


Рисунок 2.1 – Поперечный профиль ограждающей дамбы № 1

Обеспечение заданной емкости золоотвала на десятилетний срок эксплуатации принято с учетом посекционной эксплуатации золоотвала, за счет наращива-

ния его по высоте и частичного расширения площади в районе хвостовой части дамбы № 1 [27].

Устойчивость разделительных дамб зависит от уровня золы в нижнем бьефе дамбы. Поэтому на основании выполненных расчетов не допускается опережающий замыв вышележащих секций и отставание замыва нижележащих. Увязка во времени осушения секции перед наращиванием, отсыпки дамб, наращивания и замыва секций предусмотрена календарным планом эксплуатации золоотвала.

Заполнение емкости секции принято широким фронтом с выпуском пульпы по схеме «от дамбы к пруду». Сброс золошлаковой пульпы из распределительного пульпопровода должен обеспечивать равномерное по высоте заполнение секции и свободное растекание пульпы по отложениям золошлакового материала. В результате этого достигается наиболее полное фракционирование материала, то есть осаждение наиболее крупных фракций в отстойный пруд. При таком распределении материала тело золошлакоотвала формируется по принципу обратного фильтра, что обеспечивает наибольшую устойчивость верхового откоса дамбы.

Для контроля за заполнением шлакоотвалов и обеспечения качественного осветления пульпы, особенно в зимнее время, ежегодно должна производиться нивелировка поверхностных золошлаковых отложений, расположенных вне уровня воды, и промеры глубин отстойного пруда – по фиксированным постоянным створам, закрепленным столбиками на берегах и дамбах.

Наряду с формированием фракционированного зольного основания, сброс пульпы от дамбы обеспечивает отгон уреза воды отстойного пруда на безопасное для устойчивости дамб расстояние и сокращение расхода фильтрационных вод из чаши золоотвала. С целью улучшения прочностных физико-механических характеристик золошлакового основания и предотвращения выхода кривой депрессии на низовые откосы дамб, под дамбой наращивания предусмотрен трубчатый дренаж.

Наращивание ограждающих дамб золоотвала ТОО «Главная распределительная энергостанция Топар», согласно проекту, выполняется в четыре очереди, без перерыва в работе станции.

Заполнение золоотвала, согласно проекту I очереди, было предусмотрено по схеме «от дамбы к пруду», с разводкой золопроводов по гребню дамбы. Для повышения фильтрационной и статической устойчивости дамб наращивания проектом РотЭПа предусматривался трубчатый дренаж в основании дамб наращивания. Для снижения кривой депрессии и для обеспечения устойчивости низового откоса ограждающих дамб в нижнем бьефе предусмотрен трубчатый дренаж.

Для обеспечения длительной и надежной работы золошлакоотвала необходимо:

- путем намыва пляжей сокращать до возможного минимума фронт смачивания ограждающих дамб;
- своевременно устранять повреждения дамб и их защитных устройств (дренажных устройств, креплений, откосов и др.).

Во избежание размыва дамб в зоне пульповыпусков сброс пульпы из трубы должен находиться на расстоянии не менее 10 м от подошвы внутреннего откоса дамбы. Необходимо следить за плотностью заглушек и компенсаторов, расположенных над дамбами.

В целом насыпные гидротехнические сооружения – плотины и дамбы – являются весьма экономичными, возводятся из грунтовых материалов, добываемых из неглубоких временных карьеров, расположенных возможно ближе к месту строительства. При проектировании и строительстве дамб и плотин из грунтовых материалов проводятся инженерно-геологические изыскания, лабораторные исследования горных пород, слагающих основание плотины и грунтов, используемых для образования ее тела.

2.2 Разработка проекта геодезического мониторинга ограждающей дамбы № 1 золоотвала ТОО «Главная распределительная энергостанция Топар»

Для проведения геодезических наблюдений за деформациями ограждающих дамб закладываются специальные наблюдательные станции, на которых периодически проводятся инструментальные наблюдения. Наблюдательные станции, как

правило, состоят из профильных линий, по которым расположены опорные и рабочие реперы.

Проведение геодезических наблюдений в системе мониторинга безопасности ограждающих гидротехнических сооружений позволяет своевременно выявить возникшие деформации, оценить устойчивость дамб и разработать мероприятия для предотвращения аварийных ситуаций.

Наиболее опасные с точки зрения устойчивости участки ограждающих дамб характеризуются следующими признаками:

- максимальной высотой ограждающей дамбы;
- наличием слабых контактов и пластичных слоев в основании дамбы;
- повышением уровня подземных вод в связи с наращиванием дамб и расширением золоотвала;
- наращиванием дамб на зольное основание;
- насыщением тела дамбы водой и действием фильтрационных и взвешивающих сил;
- неэффективностью работы дренажной системы.

Для наблюдения за состоянием ограждающей дамбы № 1 золоотвала ТОО «Главная распределительная энергостанция Топар» в рамках научно-исследовательской работы был разработан проект наблюдательных станций, составленный на основе анализа геологического строения тела дамб и их оснований, гидрогеологических и геотехнических исследований, современного состояния и технических решений по наращиванию ограждающих дамб золоотвала.

На выбор местоположения профильной линии по телу дамбы № 1 оказали влияние следующие факторы:

- наличие значительного понижения рельефа местности в основании дамбы по поперечным направлениям и выход грунтовых вод на поверхность;
- наличие локального оползня гребня дамбы;
- наибольшая высота отсыпки дамбы;
- наличие заболоченного участка, расположенного непосредственно у нижней бровки откоса в результате фильтрации воды через тело дамбы;

- выход кривой депрессии в нижнем бьефе дамб;
- максимальная мощность рыхлых слабых грунтов в основании дамб.

Разбивка на местности созданной системы реперов производилась с помощью электронного тахеометра от опорных пунктов геодезической сети.

По результатам изучения планов земной поверхности, геологических и технологических материалов и чертежей по ограждающей дамбе № 1 было определено местоположение наблюдательной станции. Согласно геологическим данным, по оси дамбы выявлено, что наибольшая мощность рыхлых отложений в основании дамбы находится между ПК3+50 м и ПК6+50 м. Этот район по инженерно-геологическим условиям представляет, с точки зрения устойчивости дамбы, наибольший интерес. Максимальную высоту дамба № 1 имеет в районе ПК5.

В настоящее время дамба № 1 имеет отметку гребня 574,0 м, максимальная высота дамбы 34 м. По капитальности сооружений, согласно [49], дамба относится ко II классу.

Для геомониторинга были спроектированы и заложены две наблюдательные станции на ограждающих дамбах № 1 и № 2. Местоположение профильных линий выбрано таким образом, чтобы была возможность зафиксировать деформации по всем ответственным направлениям дамбы № 1 и № 2. Первая наблюдательная станция, заложённая в 2021 г. на дамбе № 1, состояла из одной профильной линии, расположенной в зоне возможных деформаций (рисунок 2.2). Наблюдательная станция дамбы № 1 состояла из трех связующих (опорных) пунктов и пяти рабочих реперов.

Опорные реперы наблюдательных станций должны быть заложены вне зоны возможных деформаций, а не в теле насыпной дамбы [64].

Также были заложены три связующих (опорных) репера с определённым базисом между этими опорными пунктами на каждой наблюдательной станции, которые располагаются в местах, обеспечивающих их неподвижность на все время существования станций, и являются контрольными пунктами при каждой серии геодезических наблюдений. Базис между связующими (опорными) реперами принимается согласно техническим характеристикам сканера (не более 300 м) [83].

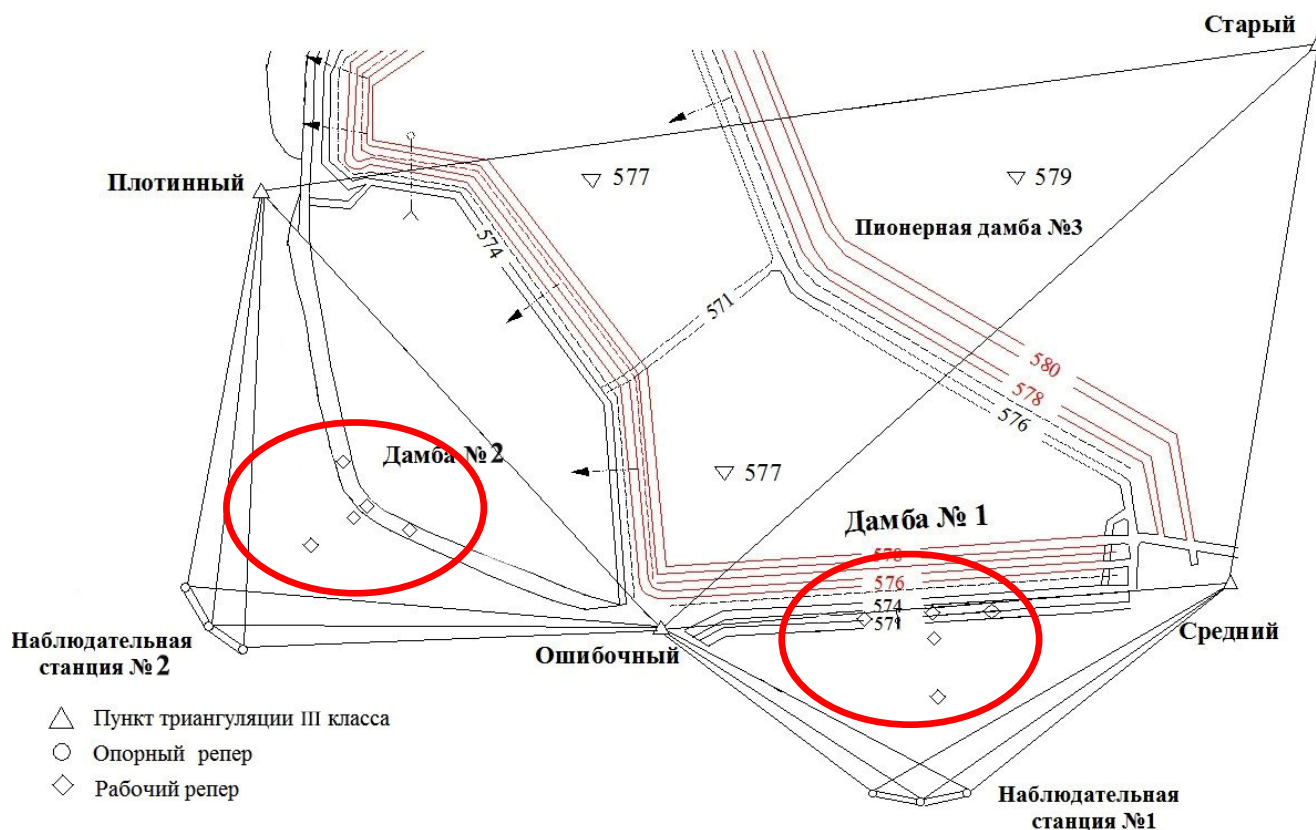


Рисунок 2.2 – План наблюдательных станций по ограждающим дамбам № 1 и № 2

Также рекомендуется закладывать связующие реперы не на одной линии, а таким образом, чтоб они образовывали угол не более 150° и не менее 90° . Это необходимо для минимизации ошибок регистрации сканов между каждой серией наблюдений.

Участки земной поверхности у основания дамб находятся в переувлажненном состоянии из-за подъема уровня подземных вод и фильтрационных процессов, происходящих в теле дамб, и они не могут быть использованы для закрепления на них опорных реперов.

В результате проведенной рекогносцировки и визуального осмотра дамб, на основании анализа инженерно-геологических условий был составлен проект закладки связующих (опорных) реперов наблюдательных станций за состоянием откосов и гребня ограждающих дамб № 1 и № 2 золоотвала.

Конструкция связующих (опорных) реперов и способ их закладки должны обеспечивать удобство и нормальные условия для производства работ при инстру-

ментальных наблюдениях; стабильность пунктов; отсутствие влияния сезонного промерзания и оттаивания грунта; надежную сохранность на весь период службы наблюдательной станции (гарантия от внешних повреждений); простоту конструкции и дешевизну изготовления [15, 23].

Во избежание вертикальных смещений репера за счет деформаций грунта, вызываемых изменением его влажности, закладка реперов производится на глубину не менее 1,5 м в рыхлых породах и не менее 0,8 м в скальных.

2.3 Методика наземного лазерного сканирования и оценка точности результатов

Сущность предлагаемой методики проведения геодезических наблюдений заключается в том, что измерения выполняются методом наземного лазерного сканирования [2, 3, 5], и для каждой наблюдательной станции достаточно создать двойной базис из трех опорных реперов, закрепленных в устойчивом месте с хорошей видимостью на все рабочие реперы.

Согласно проекту геодезического мониторинга ограждающих дамб золоотвала, наблюдательная станция должна состоять не менее чем из трех опорных пунктов и определенного количества рабочих реперов, которое уже зависит от технических характеристик дамбы, состояния устойчивости основания дамбы, наличия воды у основания дамбы. При закладке наблюдательных станций в связи с несложным строением тела дамбы, отсутствием признаков неконтролируемой фильтрации, подтопления основания дамбы, было решено заложить пять рабочих реперов, два рабочих репера размещались в основании дамбы, три других были заложены в гребне дамбы (рисунок 2.3) [62].

После разбивки профильной линии производится закладка реперов. Конструкция реперов и способ их закладки должны обеспечивать удобство и нормальные условия для производства работ при инструментальных наблюдениях за устойчивостью откосов тела дамбы в горизонтальной и вертикальной плоскостях; прочную связь с грунтом; неподверженность влиянию сезонного промерзания и оттаивания грунта; надежную сохранность на весь период службы

наблюдательной станции (гарантия от внешних повреждений); простоту конструкции и дешевизну изготовления.

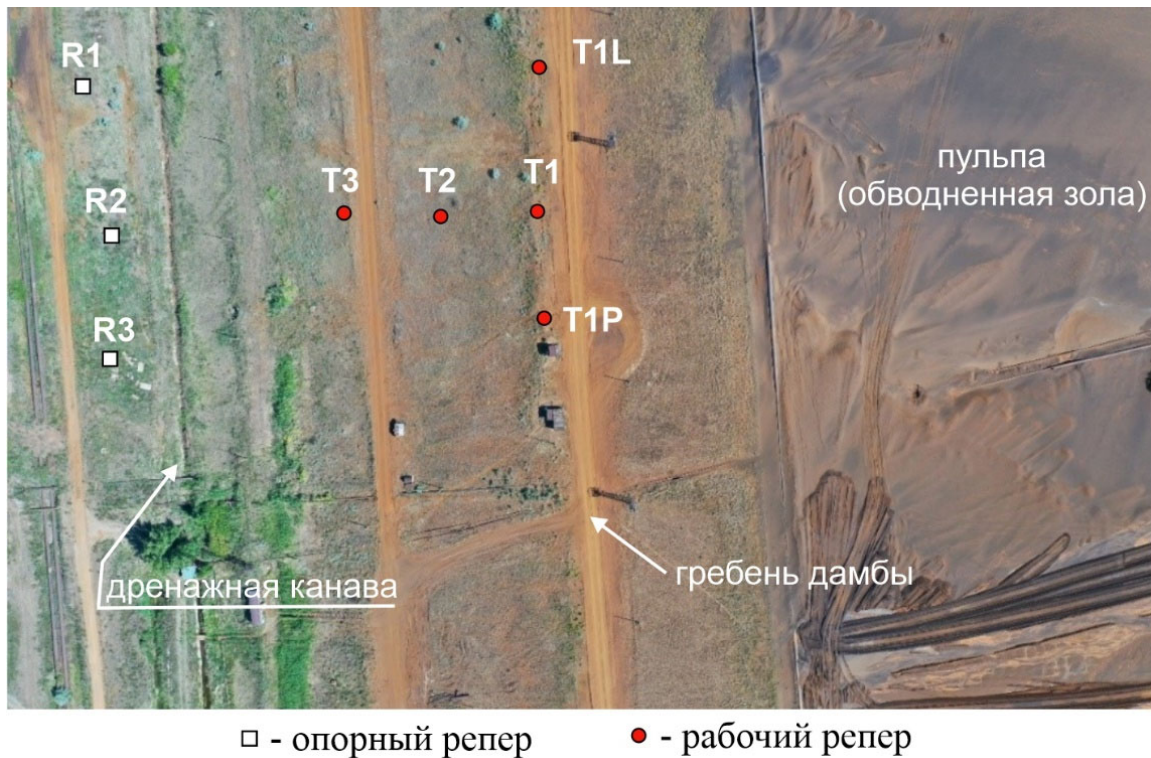


Рисунок 2.3 – Расположение опорных и рабочих реперов наблюдательной станции дамбы № 1

Для проведения мониторинга наземным лазерным сканером необходимо иметь специальные сканерные марки [26, 56], по которым производятся регистрация ТЛЮ, анализ полученных данных, определение координат марок и их взаимное наклонное расстояние. Конструкция марки была разработана таким образом, чтобы марку можно было закрепить на опорный и рабочий реперы. Для этой цели была вырезана металлическая пластина, на которую была приклеена черно-белая пленка (квадратной формы). Сама пластина приварена к цилиндрическому основанию, которая устанавливается на репер, фиксируется зажимным винтом. Диаметр цилиндрического основания марки на 2 мм больше репера (рисунок 2.4) [58].

Особенность этих марок заключается в том, что поверхность покрытия должна быть матовая. Однако изначально на пластину была приклеена глянцевая пленка.

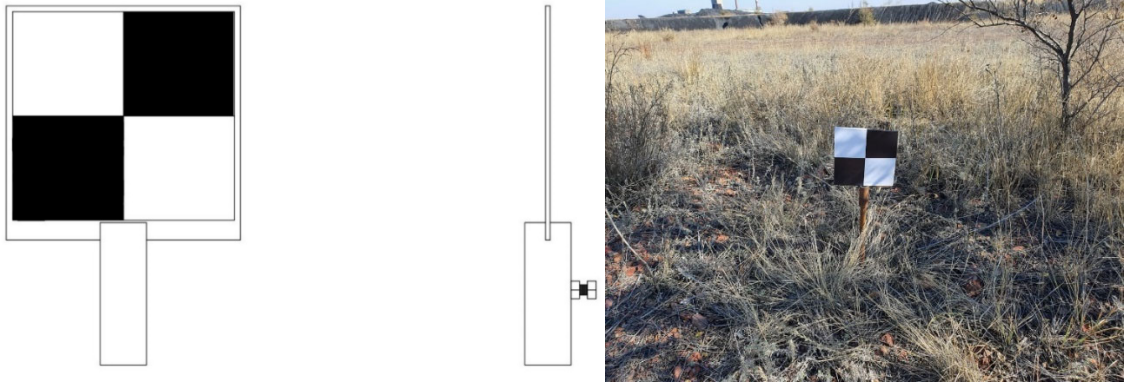


Рисунок 2.4 – Устройство сканерной марки

После первого цикла измерений марка не была определена. Причиной этому послужило то, что глянцевая поверхность имеет высокую отражательную способность, следовательно, прибор не может различить спектр сканируемого объекта. По этой причине в модуле Register некорректно определяются центры марок. В лабораторных условиях был проведен небольшой эксперимент. На расстоянии в 30 м были установлены две марки – одна с глянцевой поверхностью, другая – с матовой. Эти марки были просканированы, и затем сразу же в программном комплексе Leica Cyclone произведено распознавание марки и определение ее центра (рисунок 2.5).

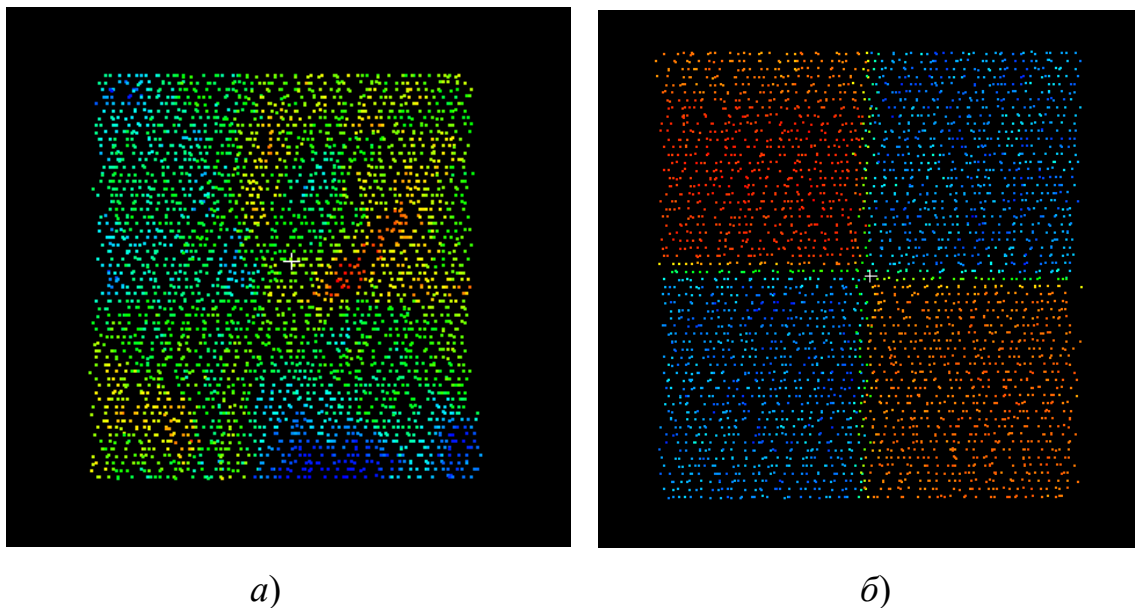


Рисунок 2.5 – Распознавание ПО Leica Cyclone сканерных марок: а) сканерная марка с глянцевым покрытием; б) сканерная марка с матовым покрытием

Исследование показало, что глянцевая марка не была распознана программным комплексом, тем самым центр марки определен неправильно. «Матовая» марка распознана правильно, центр марки определен корректно (с точностью до 1 мм), так как по «матовой» марке был определен спектр белых и черных участков марки, на чем основан принцип определения центров сканерных марок.

После разбивки наблюдательных станций и закладки опорных и рабочих реперов производится выбор установки наземной сканирующей системы (НСС). В качестве сканирующей системы использовался лазерный сканер Leica Scan Station 2, который относится к типу архитектурных сканеров и характеризуется точностью сканирования поверхностей с точностью 6 мм на 100 м [26, 83].

Основным требованием установки НСС является то, чтобы в поле сканирования попали опорные и рабочие реперы, а также окружающая ситуация с минимальными участками мертвых зон [6, 33, 60]. В данном случае существенным достоинством выбора станции наземной сканирующей системы является то, что прибор возможно установить в любом месте без привязки к определённой локации, так как полученные ТЛО будут регистрироваться относительно опорных реперов, которые уже расположены в местной системе координат. В данном случае ориентирование прибора необязательно.

После того, как были заложены опорные пункты и рабочие реперы, выбрана сканерная станция, необходимо произвести сканирование, которое состоит из нескольких этапов:

- 1) определение координат центров специальных марок, которые устанавливаются и фиксируются на заложенных реперах;
- 2) сканирование местности и объектов вокруг точки стояния сканера;
- 3) идентификация и определение приближенных координат центров специальных марок с целью дальнейшего быстрого определения их положения на скане;
- 4) сканирование специальных марок с максимальным разрешением, что позволяет с предельно возможной точностью для данной модели сканера определять их координаты.

Если сканер снабжен цифровой камерой, то выполняется также цифровая фотосъемка, что дает возможность эти операции выполнять либо по полученному скану, либо по цифровому снимку.

По проекту проведения геодезического мониторинга было произведено сканирование с двух станций. Одна станция располагалась у основания дамбы, а вторая – на гребне дамбы. Вторая станция на гребне дамбы являлась дополнительной станцией, была предназначена для сбора пространственных данных, которые необходимы для построения детальной трехмерной модели дамбы [9, 18, 20].

Полученные цифровые модели применялись для визуализации тела дамбы, а также для определения смещений и деформационных процессов в теле насыпного гидротехнического сооружения (ограждающая дамба № 1).

Для регистрации сканов в единую точечную модель необходимо, чтобы у двух сканов было, как минимум, три общих марки. Именно для этого на гребне дамбы были заложены три рабочих репера: один репер – основной, в створе профильной линии; два репера – дополнительных, предназначенных для регистрации ТЛО [67].

Два скана, сделанные на разных станциях, находятся в разных системах координат, изначально сканы имеют систему координат прибора. Регистрация ТЛО производится в программном комплексе Leica Cyclone в дополнительном модуле Register [28, 39].

Для регистрации ТЛО основным условием является то, что на двух сканах должны иметься, как минимум, три общие сканерные марки. При таком условии можно достичь высокой точности регистрации ТЛО. Исходными данными для регистрации ТЛО являются две группы точек лазерных отражений, на которых имеются три общие сканерные марки: R1, R2, R3. Эти исходные данные импортируются в модуль Register, где подгружаются все сканы и марки, в том числе единичные марки, которые имеются лишь на одном скане. После того, как были подгружены все исходные данные (сканы, марки), задается процесс регистрации сканов в одну единую точечную модель. После завершения регистрации сканов предоставляется статистика, которая показывает, по каким маркам производилась регистрация ТЛО, точность регистрации ТЛО по каждой марке (рисунок 2.6) [57, 61].

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Error	Error Vector
T3	ScanWorld 1 (...)	161021 for cy...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.002 m	(0.002, 0.000, 0.001) m
R1	ScanWorld 1 (...)	161021 for cy...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.007 m	(0.000, -0.007, 0.001) m
R2	ScanWorld 1 (...)	161021 for cy...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.002 m	(-0.002, 0.000, 0.000) m
T1	ScanWorld 1 (...)	161021 for cy...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.002 m	(0.001, 0.001, 0.000) m
T1L	ScanWorld 1 (...)	161021 for cy...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.002 m	(-0.001, 0.001, -0.001) m
T1P	ScanWorld 1 (...)	161021 for cy...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.002 m	(0.001, 0.001, -0.001) m
R3	ScanWorld 1 (...)	161021 for cy...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.003 m	(-0.002, 0.002, 0.000) m
T2	ScanWorld 1 (...)	161021 for cy...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.003 m	(0.001, 0.002, 0.001) m

Рисунок 2.6 – Точность регистрации сканов по осям системы координат

На рисунке 2.7 представлена общая СКО регистрации ТЛО.

```
Status: VALID Registration
Mean Absolute Error:
    for Enabled Constraints = 0.003 m
    for Disabled Constraints = 0.000 m
Date: 2022.04.23 23:53:10
Database name : 091021
```

Рисунок 2.7 – Среднеквадратическая ошибка регистрации ТЛО

2.4 Оценка точности результатов наземного лазерного сканирования ограждающей дамбы № 1 в системе точечного мониторинга

Гидротехнические сооружения подвержены локальным деформациям в ходе строительства и эксплуатации. Для того, чтобы предотвратить разрушение и своевременно зафиксировать начальный момент деформирования и смещения основания или тела ограждающих дамб, необходимо определить критерии выявления этих смещений [63].

При наблюдениях за состоянием ограждающих дамб и плотин применяются новые методы и технологии сбора более точных и более полных данных об исследуемом объекте. В данном случае была применена технология наземного лазерного сканирования с использованием лазерного сканера Leica ScanStation 2 [69].

Чтобы обосновать применение данной методики в высокоточных наблюдениях, необходимо произвести оценку точности полученных результатов с применением наземной сканирующей системы Leica ScanStation 2, сравнить эти данные с результатами, полученными электронным тахеометром Leica MS50 с угловой точностью 1" (таблица 2.1) и рассчитать среднеквадратическую погрешность (СКП) [25, 42, 65].

Таблица 2.1 – Результаты определения координат центров опорных и контрольных марок лазерным сканером и электронным тахеометром

Репера	Сканер			Тахеометр			Δx , мм	Δy , мм	Δz , мм
	X, м	Y, м	Z, м	X, м	Y, м	Z, м			
R1	998,468	1069,737	500,142	998,470	1069,745	500,143	-2	-8	-1
R2	965,078	1011,029	500,184	965,078	1011,031	500,184	0	-2	0
R3	950,644	946,212	499,991	950,644	946,212	499,991	0	0	0
T1	1078,908	966,128	508,901	1078,911	966,128	508,901	-3	0	0
T1L	1088,178	997,941	508,368	1088,180	997,940	508,367	-2	1	1
T1P	1063,867	923,983	509,092	1063,869	923,983	509,090	-2	0	2
T2	1057,440	976,864	501,179	1057,444	976,863	501,180	-4	1	-1
T3	1026,449	992,637	500,660	1026,453	992,639	500,660	-4	-2	0

Для начала производится расчет квадратов модулей векторов смещений:

$$\Delta_i^2 = \Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2. \quad (2.1)$$

После этого оценивается СКП полученных измерений по формуле Бесселя:

$$m = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n-1}}, \quad (2.2)$$

где $\sum \Delta_i^2$ – сумма квадратов модулей векторов смещений, мм;

n – число значений полученных результатов.

По результатам выполненных расчетов получено значение СКП определения координат марок при сканировании:

$$m_{\text{факт}} = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{79}{8-1}} = 3,4 \text{ мм.}$$

Рассчитанное СКП хорошо соответствует данным технической характеристики сканера, где точность определения пространственного положения точки для дальности 100 м оценивается в ± 6 мм.

Из известного соотношения между точностью прибора и его СКП при надежности $\gamma = 95 \%$ имеем:

$$t = 2 \cdot \sigma. \quad (2.3)$$

Соответственно из формулы (3.3) получим:

$$\sigma = \frac{t}{2} = \pm 3 \text{ мм.} \quad (2.4)$$

Значение фактической погрешности на 0,4 мм больше, чем сигма, это можно объяснить большими расстояниями (более 100 м) до фланговых опорных точек и сложными условиями работы на объекте.

Рассчитав и оценив точность полученных результатов, стоит отметить, что данная методика применима для проведения геодезического мониторинга, но также стоит учитывать, что на результаты наземного лазерного сканирования основное влияние оказывают следующие метрологические свойства объектов: форма и отражающая способность, которая, в свою очередь, определяется текстурой, цветом. Влияние объекта съемки на точность получения пространственной информации, в основном, проявляется в погрешности измеряемых расстояний.

Влияние таких характеристик объекта, как форма, цвет и структура, учитывать в реальных условиях сканирования очень сложно, поэтому трудно сделать однозначные выводы о точности получения данных сканирования того или иного объекта. Эту задачу можно решить, применяя методы математического моделирования процесса сканерной съемки конкретных объектов.

Используя лазерное сканирование, можно определить положение точек наблюдательных линий с точностью, сопоставимой с точностью определения электронным тахеометром.

2.5 Сравнительный анализ площадных моделей участка дамбы № 1 золоотвала

Систематические инструментальные наблюдения за состоянием насыпных гидротехнических сооружений являются одним из основных методов их обследования и имеют большое практическое и научное значение. Результаты наблюдений используются как исходный материал для характеристики состояния откосов дамб и плотин; на их основе изучают характер протекания деформационных процессов, делают соответствующие прогнозы, составляют рекомендации по повышению надежности.

Традиционные методы инструментальных наблюдений основаны на определении координат ряда жестко закрепленных точек (реперов), располагаемых по определенным схемам, и оценке фиксируемых смещений.

Технология наземного лазерного сканирования позволяет перейти от точечных методов к площадным, значительно увеличить объем получаемой информации и получить наиболее полное и наглядное представление о распределении деформаций по поверхности исследуемого объекта. Особое значение инструментальные наблюдения, предусматривающие наземное лазерное сканирование тела дамбы или их участков, приобретают в случаях, когда имеют место активные деформации, ограничивающие применение обычных методов наблюдений отсутствием безопасного доступа к исследуемому участку.

Принцип тотальной съемки объекта, а не его отдельных точек, как при съемке электронным тахеометром, характеризует наземное лазерное сканирование как съемочную систему, результатом работы которой является трехмерное изображение, или точки лазерных отражений. Formой представления результатов наземного лазерного сканирования является массив точек, находящихся в поле зрения ска-

нера, с пятью характеристиками, а именно пространственными координатами (X , Y , Z), интенсивностью отражения и реальным цветом объектов сканирования.

Для мониторинга устойчивости ограждающей дамбы золоотвала ТОО «Главная распределительная энергостанция Топар» была использована наземная лазерная сканирующая система Leica ScanStation 2, которая позволяет выполнять сканирование в радиусе 300 м и имеет максимальную погрешность измерений 6 мм.

Основой для лазерного сканирования является сеть опорных реперов наблюдательной станции, координаты которых предварительно определяются по результатам спутниковых наблюдений. Точки стояния сканера выбираются исходя из конфигурации дамбы для обеспечения перекрытия ТЛО, позволяющего получить полноту съемки объекта.

Результатом наземного лазерного сканирования является большой массив точек (от нескольких сотен тысяч до нескольких миллионов), образующих точечную модель (рисунок 2.8).

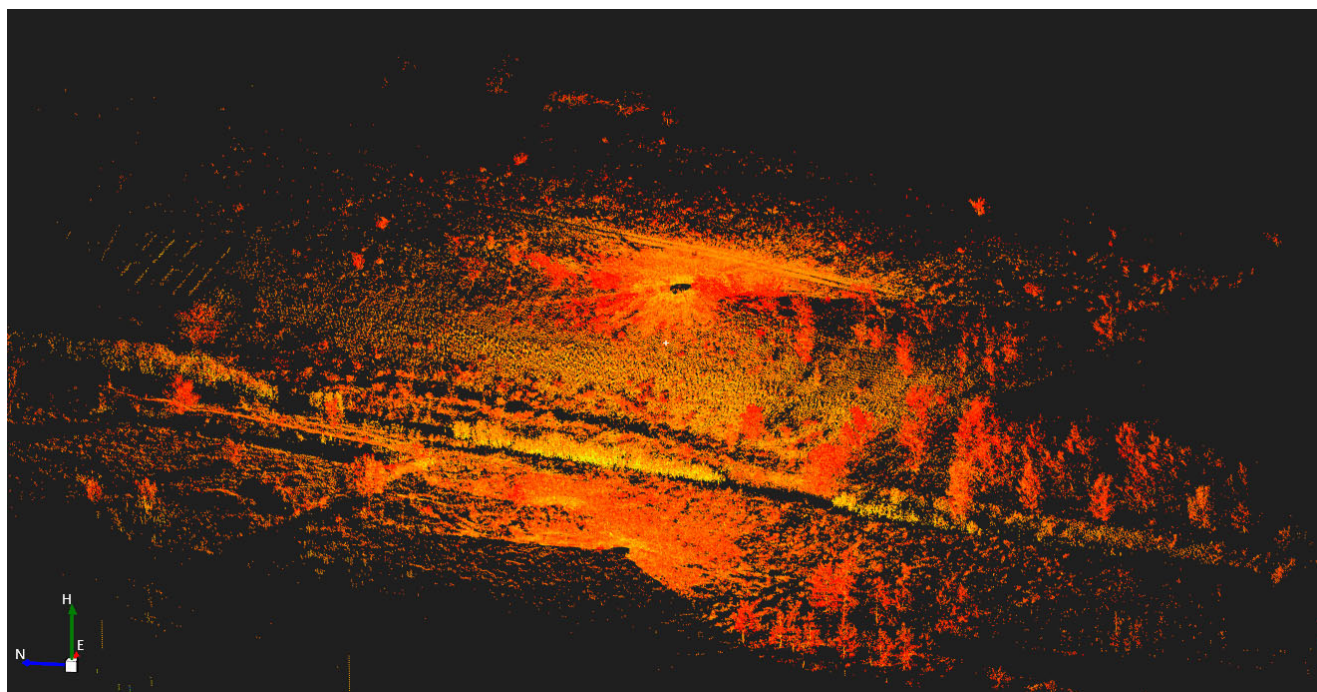


Рисунок 2.8 – Точки лазерных отражений дамбы № 1

Вторым этапом исследовательской работы являлось сравнение двух облаков точек одного и того же участка дамбы, в одной системе координат, но сделанные в разный период времени. Этот этап производился в двух разных программных комплексах, осуществляющих обработку по разным принципам и методам, что позволило определить наиболее точный вариант проведения анализа.

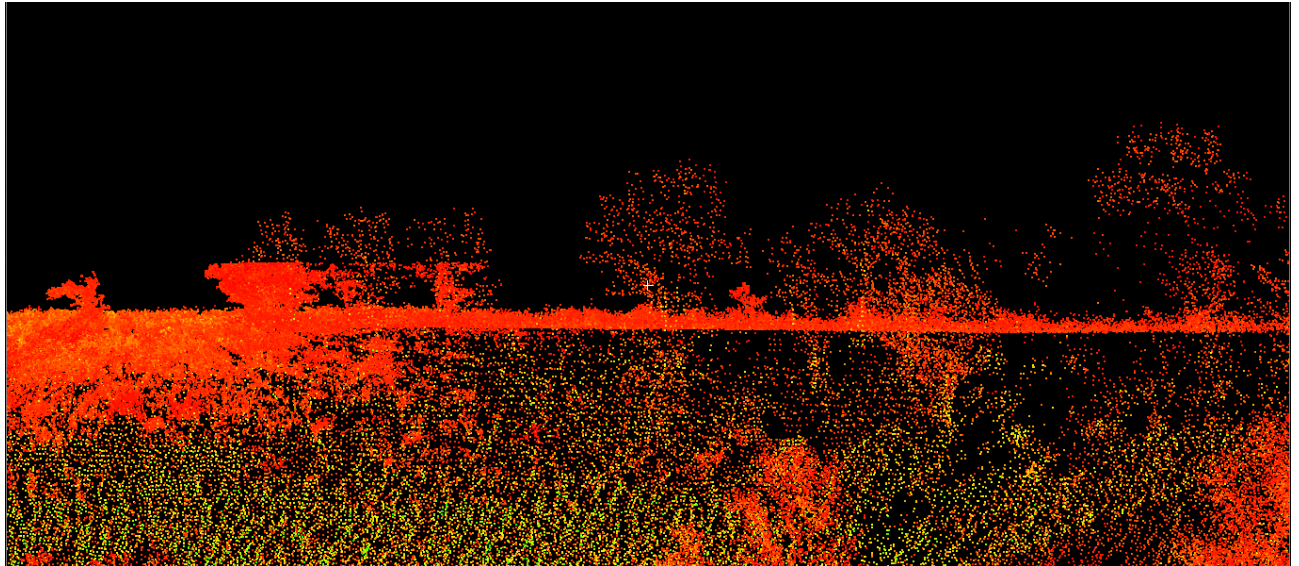
Рассмотрено два способа сравнительного анализа ТЛО разных циклов сканирования, которые производились в двух программных комплексах – TerraSolid и 3D Reshaper. Было проведено сканирование одного участка дамбы № 1 в три цикла – 8 августа, 25 сентября и 17 октября 2022 г. В связи с этим в сравнении использовались данные трех циклов измерений. Сканы были привязаны к уже созданной опорной сети. После проведения полевых работ сканирования исследуемых участков дамбы была выполнена камеральная обработка, которая включала в себя два этапа:

- 1) чистка сканов от шумов – удаление движущихся объектов (травы, деревьев, людей, транспорта); объектов, не относящихся к телу дамбы;
- 2) сравнительный анализ точек лазерных отражений гидротехнического сооружения.

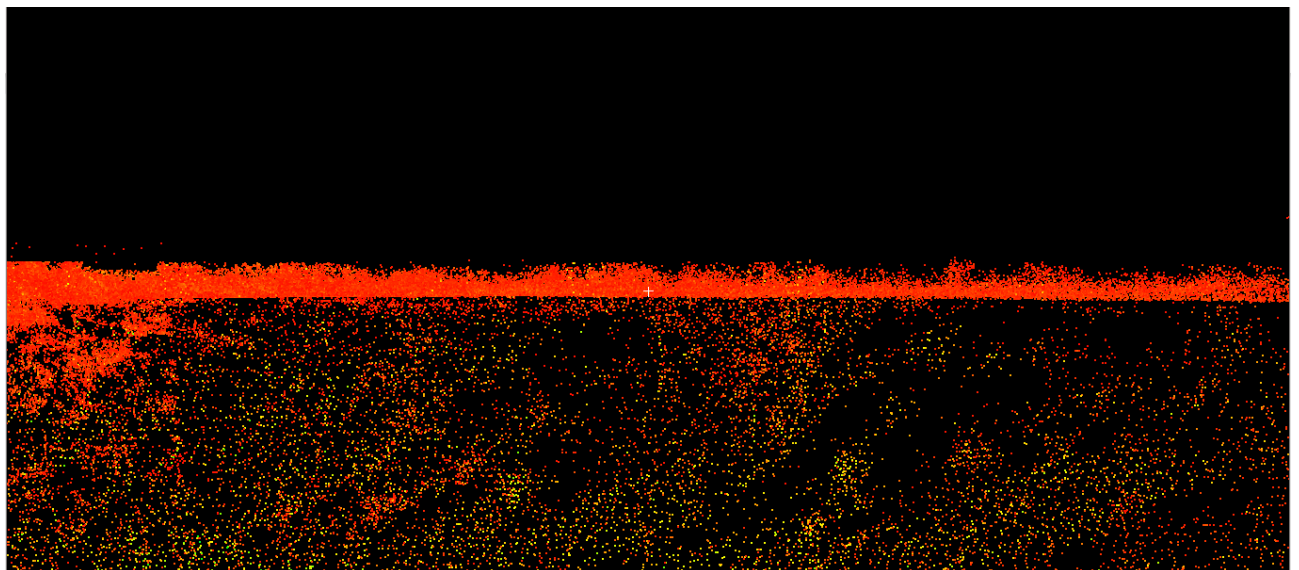
Сравнительный анализ ТЛО в программном комплексе 3D Reshaper. В связи с тем, что ПО Leica Cyclone обладает функциями чистки и фильтрации ТЛО, а ПО 3D Reshaper имеет возможности сравнительного анализа массива точек, эти программные комплексы были приняты за основной инструмент проведения первого способа данного исследования.

Представлен первый этап камеральной обработки, который заключается в том, чтобы произвести фильтрацию ТЛО от шумов, ненужных точек объектов, которые не будут участвовать в анализе. Фильтрация ТЛО происходила двумя способами. Первый способ заключался в том, чтобы удалить точки объектов, которые не входили в строение тела насыпной дамбы. К таким объектам относились деревья, трава, линии электропередачи, люди, транспорт, осадки и т. д. Для этого использовался инструмент «Выделение» в ПО Leica Cyclone. Этим инструментом на обла-

ках точек выделялись «шумовые» точки и удалялись. На рисунке 2.9 представлена точечная модель до и после удаления «шумовых» точек.



a)



б)

Рисунок 2.9 – ТЛО дамбы № 1 после удаления шумов:

a) до фильтрации; *б)* после фильтрации

После удаления локальных участков ТЛО, которые относятся к объектам, не входящим в строение тела дамбы, необходимо удалить точки мелкой растительности. Так как мелкая растительность произрастает прямо на сухом откосе дамбы, то

при получении сканов точки растительности очень плотно расположены к точкам тела дамбы, и для того, чтобы удалить эти точки, способ выделения и их удаления не подходит.

Второй способ удаления «шумовых» точек заключается в том, что удаляются точки по определенному коэффициенту интенсивности отражения лазерного импульса, испускаемого наземным лазерным сканером.

Интенсивность отраженного импульса представляет значение энергии сигнала, вернувшегося в приемник лазерного сканера. Эта величина зависит от дальности излучения, отражательной способности объекта, состояния атмосферы и других факторов.

Изображения в форме интенсивности отраженного импульса позволяют выявить различные объекты местности, а также их свойства, состояние и взаимное положение. Важной задачей при этом является классификация пространственного массива данных, т. е. разделения точек по классам в соответствии с заданными критериями.

Для построения топографических планов по результатам трехмерного сканирования можно выделить несколько классов, например, точки, принадлежащие земной поверхности, растительности, зданиям и инженерным сооружениям и др. На изображениях по интенсивности лазерных отражений достаточно четко выделяются не только площадные объекты, но и объекты линейного типа.

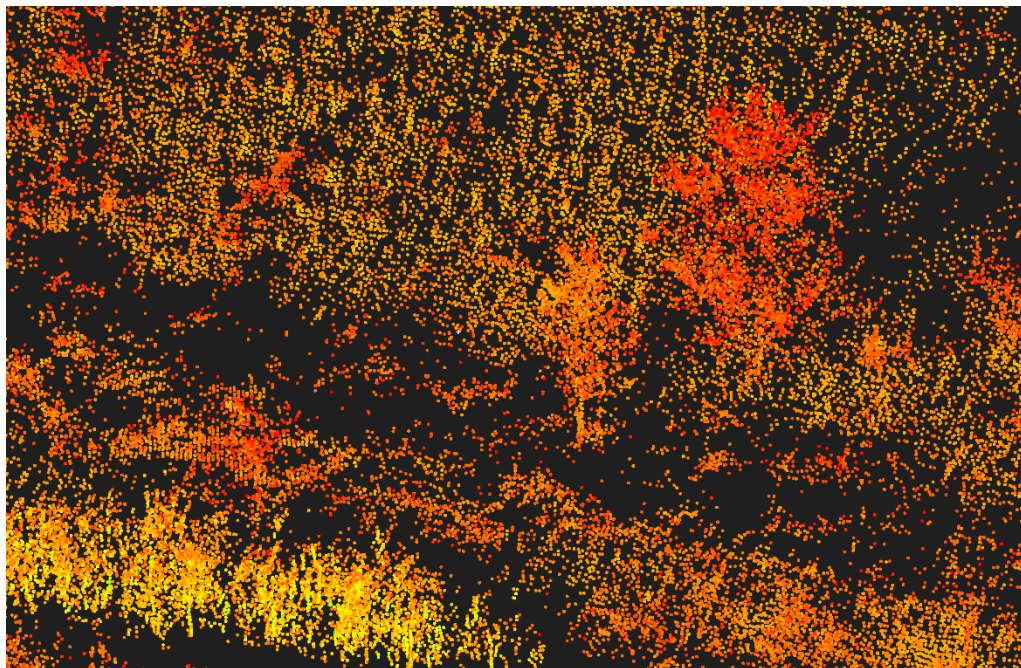
Классификация лазерных точек предполагает установление принадлежности каждой точки или группы тому или иному объекту местности: инженерному сооружению, поверхности рельефа, растительности и т. д. Наличие такой информации позволяет автоматизировать дальнейший процесс обработки результатов лазерного сканирования и выделять целый ряд объектов местности из всей совокупности точечной модели.

Результаты сканирования отображаются разными способами цветного кодирования точек, а именно – с учетом расстояния, высоты, угла отражения, освещенности и других факторов. В современных технологиях обработки имеется возмож-

ность применить к пространственным данным параметры стиля классификации, а также другие параметры стилей, позволяющие создать реалистичный вид трехмерного массива точек.

С помощью стилей отображения устанавливаются различные режимы просмотра трехмерных массивов точек, а также варианты фильтрации пространственных данных. Такие данные могут быть представлены в соответствии с тем или иным кодом, который был им присвоен в процессе классификации.

В результате точки будут отображаться в соответствии с присвоенной им цветовой кодировкой (рисунок 2.10), установленной при классификации. Это особенно важно, когда необходимо выделить разные элементы местности, захваченные во время сканирования, а также особо следует выявить и отобразить состояние поверхности инженерного сооружения, например, с учетом влажности, температуры поверхности и других факторов.



- точки с низкой интенсивностью отраженного сигнала
- точки со средней интенсивностью отраженного сигнала
- точки с высокой интенсивностью отраженного сигнала

Рисунок 2.10 – Цветовое кодирование точек

Стиль точек можно скорректировать, чтобы отфильтровать нежелательные элементы из общего массива.

На основе отфильтрованных данных лазерного сканирования появляется возможность автоматизировать дальнейшие процессы обработки, а также 3D-моделирования, например, создания трехмерной (твердотельной) модели объекта. В рамках исследования это позволит качественно произвести сравнительный анализ ТЛО разных циклов наблюдений.

Среднее значение такого коэффициента можно подсчитать по следующей формуле:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N DK_i, \quad (2.5)$$

где N – общее количество лазерных точек;

D – вес коэффициента K лазерного отражения, зависящего от расстояния, отражающей поверхности и др.

Дисперсию результатов сканирования следует вычислить по формуле:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (DK_i - \mu)^2. \quad (2.6)$$

Тогда стандартное отклонение (Std. Dev.) вычисляется по следующей формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (DK_i - \mu)^2}. \quad (2.7)$$

Таким образом, по данной методике классификация точек геопространственных данных, полученных при наземном лазерном сканировании, позволит сгруппировать точки растительности, их удалить или отфильтровать из общей точечной модели.

Программный комплекс Leica Cyclone позволяет отфильтровать точки по интенсивности отраженного импульса по следующему алгоритму.

1 Необходимо выделить ТЛО, где присутствуют точки с низким коэффициентом интенсивности отражения импульса. Применяв данную функцию, программа автоматически показывает точки с самым низким коэффициентом – 0,128 5. Этот

коэффициент показывает точки, которые относятся к движущимся объектам, в частности растительность, колеблющуюся от ветра. Она также окрашена в ярко-красный цвет и от общего количества точек составляет 13 %.

2 Растительность на сухом откосе имела более высокий коэффициент интенсивности, это было подтверждено более светлыми цветами окраса точек (оранжевый). Соответственно был принят средний коэффициент интенсивности до 0,289 0 (рисунок 2.11). Выделенные точки с установленным коэффициентом интенсивности 0,2890 были отфильтрованы и перенесены на новый слой (рисунок 2.12).

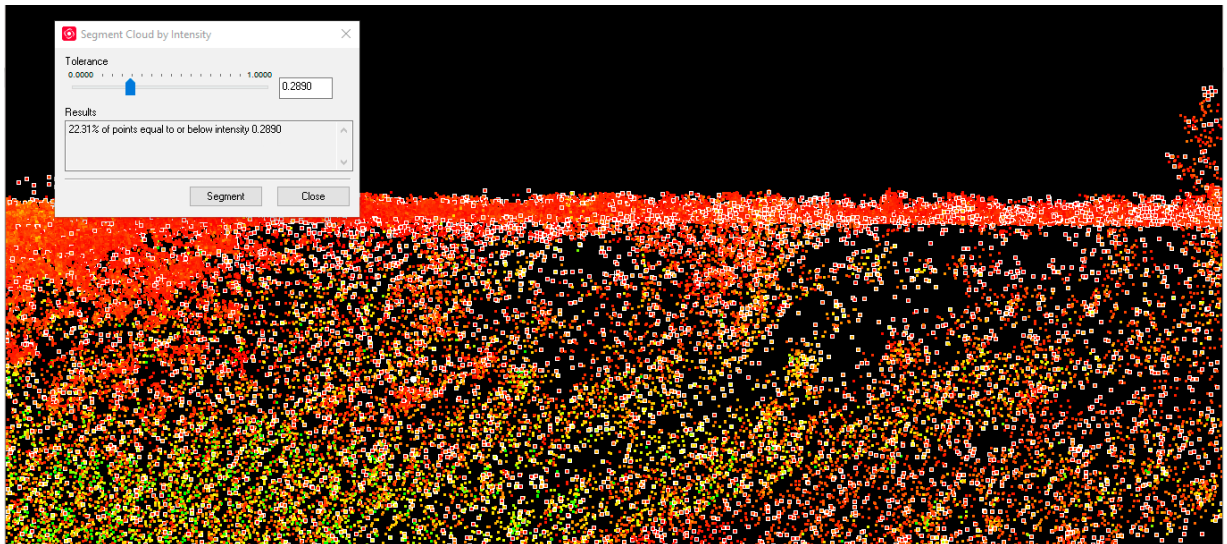


Рисунок 2.11 – Выделение точек по коэффициенту интенсивности

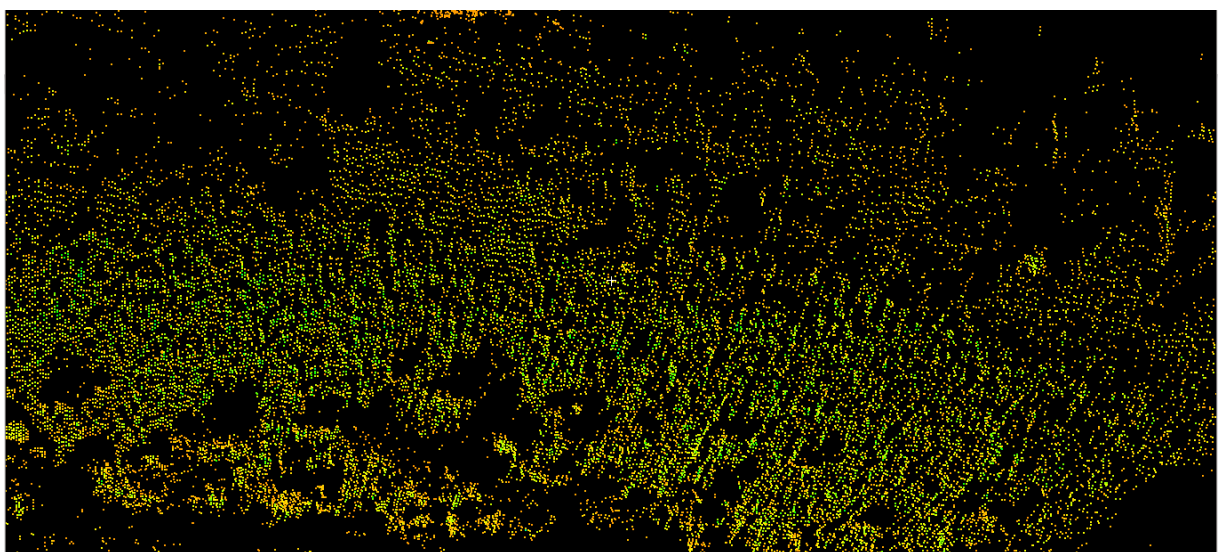


Рисунок 2.12 – Группа точек с коэффициентом интенсивности выше 0,289 0

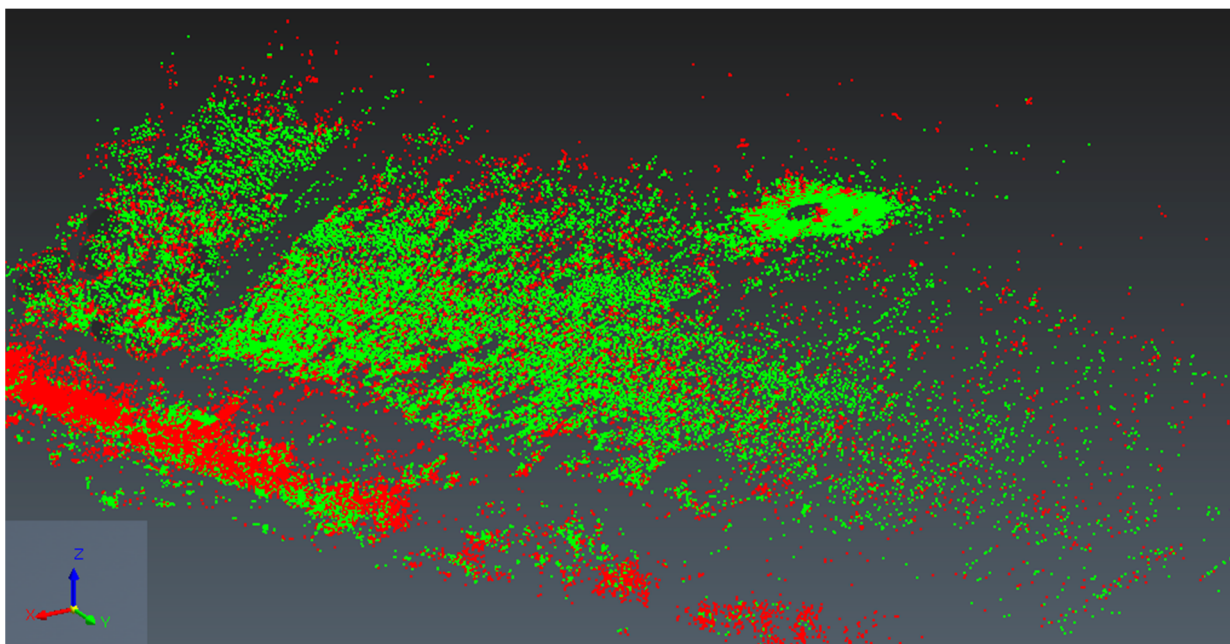
Такая процедура фильтрации облаков точек была проведена с пространственными данными, полученными при трех циклах наблюдений. Сравнительные данные по фильтрации ТЛО представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Анализ по фильтрации облаков точек

Параметры анализа	1-й цикл сканирования	2-й цикл сканирования	3-й цикл сканирования
Коэффициент интенсивности отраженного сигнала	0,289 0	0,289 0	0,289 0
Доля точек от общего скана, имеющие равный или ниже коэффициент интенсивности 0,289 0	22,31 %	25,48 %	19,93 %

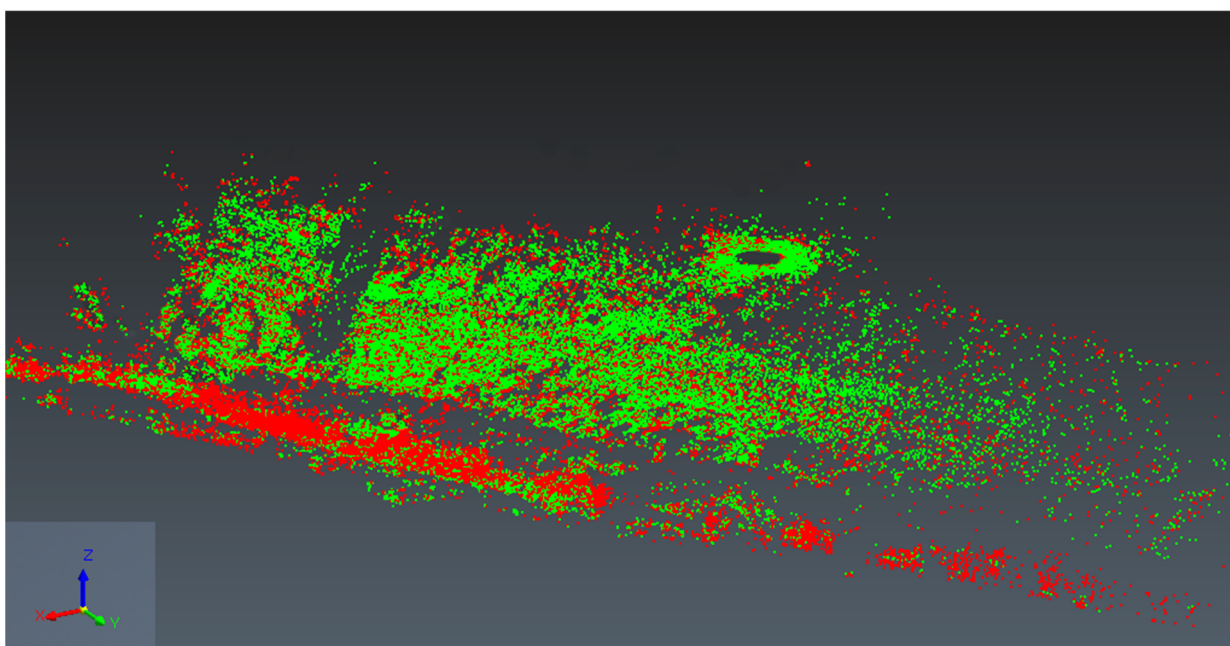
После получения «чистых» сканов, они были экспортированы в универсальный формат *.E57 для второго этапа камеральной работы – сравнительного анализа ТЛО в программном комплексе 3D Reshaper.

Полученные файлы «чистых» сканов трех циклов наземного лазерного сканирования импортируются в программный комплекс 3D Reshaper парно (1-й и 2-й циклы, 2-й и 3-й циклы, 1-й и 3-й циклы). После импорта необходимо во вкладке Измерения выбрать инструмент Сравнение / анализ. Этот инструмент позволяет сравнить ТЛО и выявить отклонения между точками (на сколько один скан отличается от другого). В анализе необходимо задать базовое ТЛО, относительно которого будет сравниваться второе ТЛО. За базовое ТЛО можно принять любой скан – первый или второй. Следующим шагом анализа необходимо задать линейное отклонение точек от базового скана. При линейном отклонении в ± 30 мм было получено, что более 70 % точек находятся в данном диапазоне линейных отклонений, а оставшиеся превышают это значение, но в тот же момент эти точки равномерно распределены по скану (рисунки 2.13–2.15).



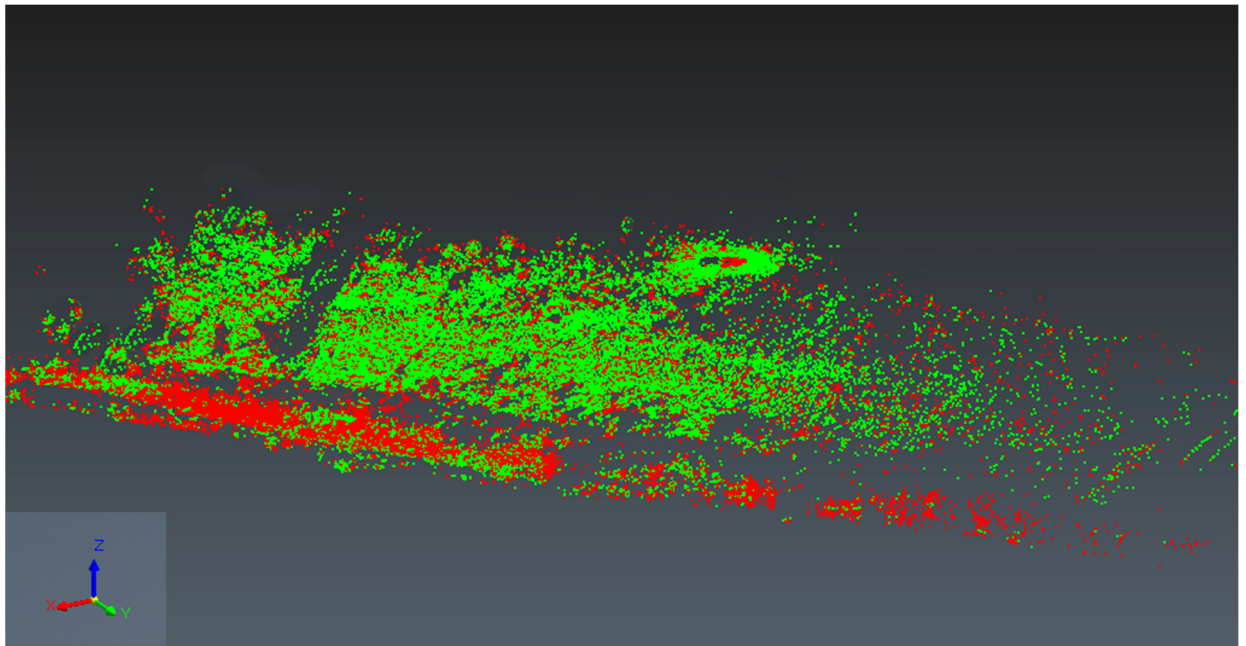
Отклонение между ТЛО: менее +/-30мм – ■
более +/-30мм – ■

Рисунок 2.13 – Сравнение ТЛО 1-го и 2-го циклов сканирования



Отклонение между ТЛО: менее +/-30мм – ■
более +/-30мм – ■

Рисунок 2.14 – Сравнение ТЛО 2-го и 3-го циклов сканирования



Отклонение между ТЛО: менее +/-30мм – ■
 более +/-30мм – ■

Рисунок 2.15 – Сравнение ТЛО 1-го и 3-го циклов сканирования

Из этого следует вывод, что точки, которые не сосредоточены в одном локальном участке скана, а распределены по скану равномерно, не подтверждают наличие деформационных процессов в теле дамбы. Величина ± 30 мм была выбрана в связи с тем, что при увеличении данного значения процент точек входящих в скан, увеличивается до 100 %, а при снижении линейного отклонения – уменьшается, но это уменьшение также показывает равномерное распределение точек, превышающих линейное отклонение. Однако значение линейного отклонения ± 30 мм превышает допустимые значения отклонения координат точек, полученных традиционными методами измерений, но также стоит принять во внимание, что поверхность сканируемого объекта не идеально гладкая и подвержена изменению под влиянием внешних факторов (дождь, ветер). Соответственно линейное отклонение ± 30 мм – удовлетворительное значение, которое позволяет сделать определенные выводы по состоянию насыпной дамбы.

Сравнительный анализ поверхностей в программном комплексе TerraSolid.
 Теперь рассмотрим второй способ сравнительного анализа ТЛО – в программном

комплексе TerraSolid. Семейство модулей Terrasolid обеспечивает решение практически всего круга технологических задач, возникающих как в процессе съемки, так и в процессе камеральной обработки полученных данных – от подготовки проекта до формирования конечных продуктов. В качестве платформы для приложений TerraSolid используются программные продукты компании Bentley Systems, которые обеспечивают самую высокую производительность среди САД-систем.

Основным преимуществом программного комплекса является то, что TerraSolid включает множество методов автоматической обработки данных лазерного сканирования. Если необходимо последовательно выполнить несколько этапов автоматической обработки, то для этого создают макросы, в котором каждый этап обработки данных следует друг за другом. Такими этапами могут быть классификация ТЛО, удаление ТЛО какого-либо класса, модификация, их трансформирование и другие этапы обработки.

Как и в каждом программном комплексе, который производит обработку точек лазерных отражений, необходимо произвести импорт данных лазерного сканирования через модуль программного комплекса TerraSolid – TerraScan. Этот модуль позволяет не только импортировать и экспортировать ТЛО в определенном формате, а также производить определенные операции – группировать ТЛО, удалять, фильтровать, создавать макросы для определенных действий с ТЛО под определенные задачи исполнителя.

Первым этапом обработки стало импортирование точек в рабочую среду программного комплекса Bentley (рисунок 2.16).

Если проанализировать ТЛО, то на нем сразу определяются объекты (рисунок 2.17), которые будут создавать помехи для сравнительного анализа сканов разных циклов наблюдений. Следовательно, необходимо отфильтровать ТЛО всех циклов наблюдений, и для дальнейшего исследования получить точки, принадлежащие телу дамбы № 1. Для этого используются функциональные возможности модуля TerraScan, который позволит классифицировать точки земли (тела дамбы) от прочих «шумовых» точек (деревья, кустарники, мелкая растительность, столбы, ЛЭП и т. д.).

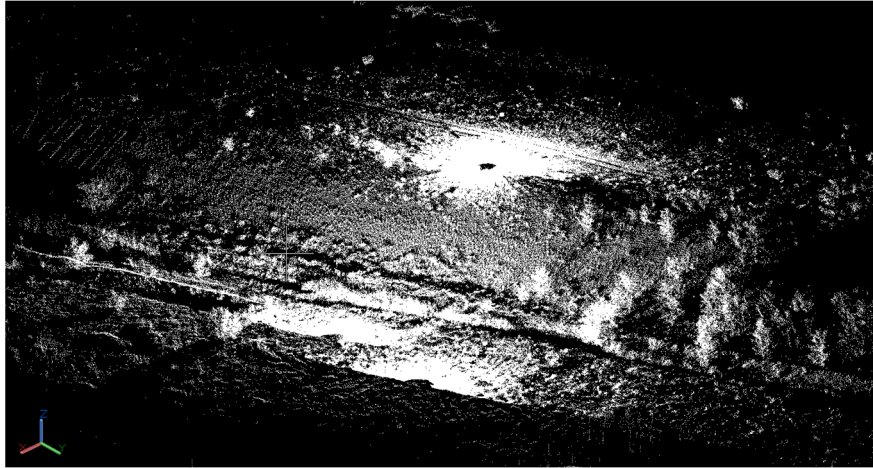


Рисунок 2.16 – Точки лазерных отражений в рабочей среде ПК Bentley

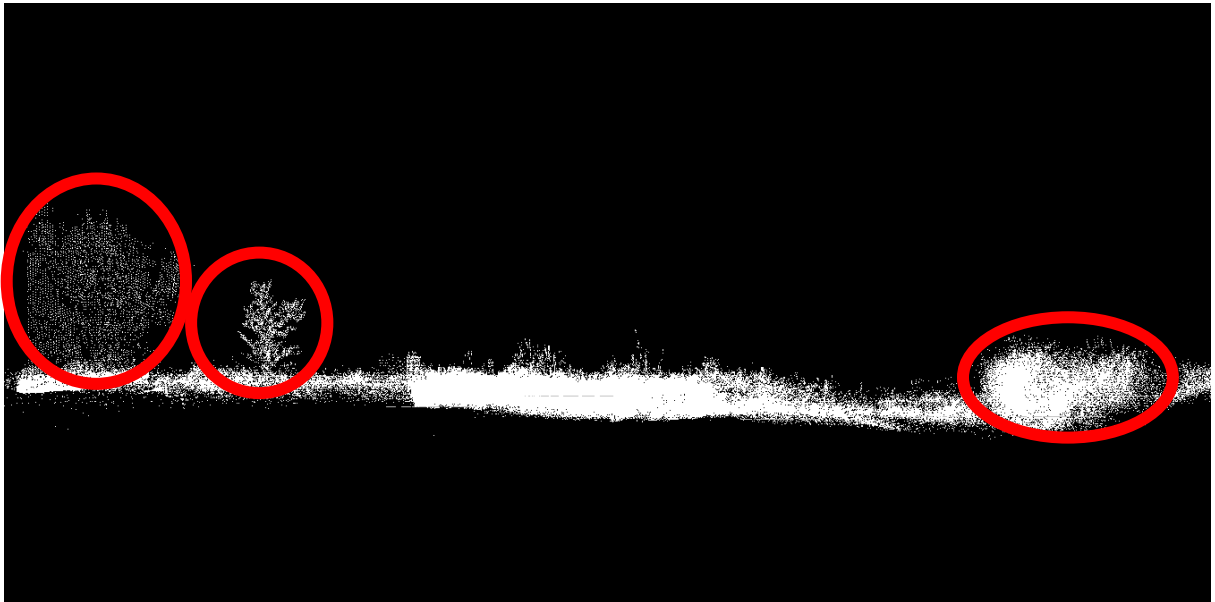


Рисунок 2.17 – Фрагмент ТЛО с наличием шумов

Классификация ТЛО может быть выполнена как с помощью автоматических, так и с помощью интерактивных процедур. TerraSolid содержит ряд инструментов такой классификации. При проведении сравнительного анализа будет применен автоматический метод классификации точек. Автоматическая классификация ТЛО в данном ПК основана на методе молдинга. Его концепция основана:

- на использовании формы представления в виде сети треугольников;
- построении поверхности земли методом итерации с постоянным контролем сходимости;

– использовании некоторого набора аналитических ограничений, отражающих гладкость поверхности «истинной земли» [4].

Суть метода молдинга показана на рисунке 2.18.

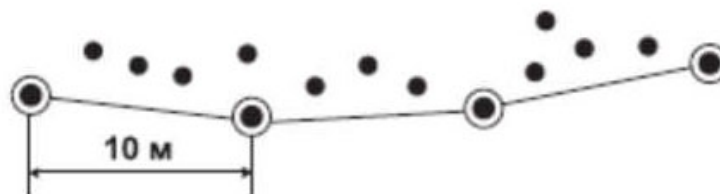
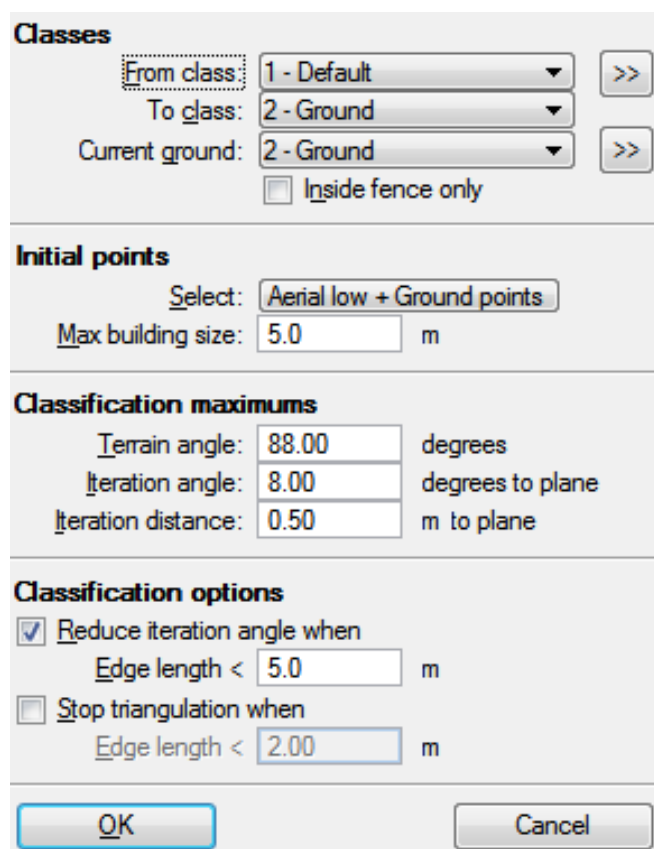


Рисунок 2.18 – Метод молдинга

Задав определенные параметры и значения классификации ТЛО через макросы (рисунок 2.19), было произведено разделение ТЛО на две группы – точки земли (тела дамбы) и точки прочих объектов.

The screenshot shows a software dialog box with several sections. The 'Classes' section has dropdown menus for 'From class' (1 - Default), 'To class' (2 - Ground), and 'Current ground' (2 - Ground), along with an 'Inside fence only' checkbox. The 'Initial points' section has a 'Select' dropdown (Aerial low + Ground points) and a 'Max building size' input (5.0 m). The 'Classification maximums' section has inputs for 'Terrain angle' (88.00 degrees), 'Iteration angle' (8.00 degrees to plane), and 'Iteration distance' (0.50 m to plane). The 'Classification options' section has a checked 'Reduce iteration angle when' checkbox with an 'Edge length <' input (5.0 m), and an unchecked 'Stop triangulation when' checkbox with an 'Edge length <' input (2.00 m). At the bottom are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Classes	
From class:	1 - Default
To class:	2 - Ground
Current ground:	2 - Ground
<input type="checkbox"/> Inside fence only	

Initial points	
Select:	Aerial low + Ground points
Max building size:	5.0 m

Classification maximums	
Terrain angle:	88.00 degrees
Iteration angle:	8.00 degrees to plane
Iteration distance:	0.50 m to plane

Classification options	
<input checked="" type="checkbox"/> Reduce iteration angle when	
Edge length <	5.0 m
<input type="checkbox"/> Stop triangulation when	
Edge length <	2.00 m

Рисунок 2.19 – Макрос для классификации земли

Параметр «Максимальная сторона здания (Max building size)» определяет наибольший размер сторон зданий в ТЛО. Данный параметр применяется при классификации ТЛО воздушного лазерного сканирования. При наземных методах лазерного сканирования вследствие небольших размеров блоков параметр следует выставлять минимальным. Параметр «Угол земли (Terrain Angle)» определяет самый крутой уклон земли. Параметр «Угол итерации (Iteration ange)» определяет максимальный угол между точкой, её проекцией на ребро треугольника и следующим узлом треугольника. Параметр «Расстояние итерации (Iteration distance)» служит для того, чтобы убедиться, что в процессе итерации не будет сильных скачков по высоте, когда сторона треугольника большая. Например, крыши зданий могут быть при большой стороне треугольника классифицированы как земля. Учитывая тот факт, что на полученных ТЛО отсутствуют здания, этот метод классификации вполне подойдет для данной научно-исследовательской работы. При этом отпадает необходимость производить дополнительные операции по фильтрации ТЛО [17]. На рисунке 2.20 показана связь между углом и расстоянием итерации.

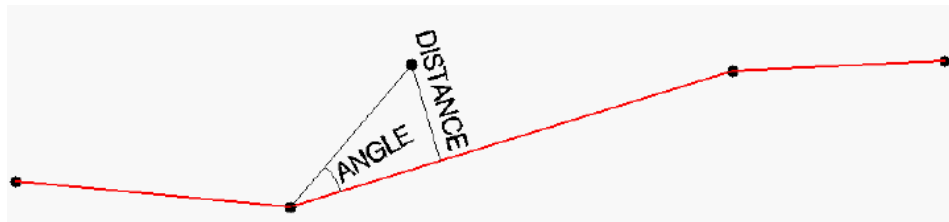
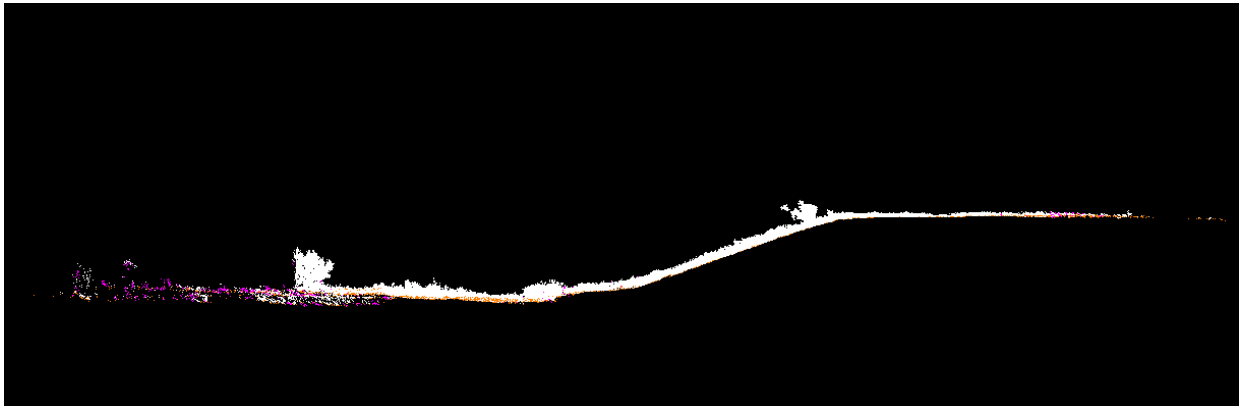


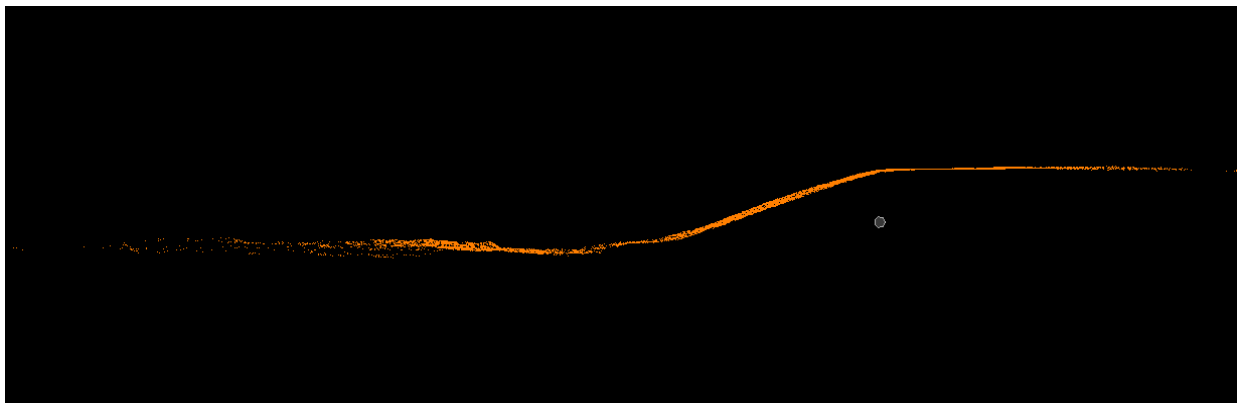
Рисунок 2.20 – Взаимосвязь угла и расстояния итерации

В дальнейшей работе активными остаются точки земли, которые будут участвовать в сравнительном анализе. Результаты фильтрации показаны на рисунке 2.21.

После фильтрации точек выполняется следующий этап анализа – сравнение точек земли (тела дамбы) между циклами сканирования. В связи с тем, что с применением ПК TerraSolid было получено ТЛО, наиболее качественное и чистое от шумов, чем ТЛО, отфильтрованное в ПК Leica Cyclone методом фильтрации по интенсивности отраженного сигнала, дальнейшее сравнение циклов измерений будет производиться по поверхностям, созданными относительно ТЛО земли.



а)



б)

Рисунок 2.21 – Результаты классификации точек лазерного отражения:
 а) до фильтрации (классификации точек); б) после фильтрации
 (классификации точек) – поверхность тела дамбы

Следовательно, следующим действием анализа является построение поверхностей (рисунок 2.22) по трем циклам наземного лазерного сканирования. Данная операция также производится в ПК TerraSolid. Принцип построения поверхностей осуществляется по методу Делоне, который описан в [4]. Суть этого метода построения поверхностей заключается в следующем: система взаимосвязанных неперекрывающихся треугольников имеет наименьший периметр, если ни одна из вершин не попадает внутрь ни одной из окружностей, описанных вокруг образованных треугольников. Образовавшиеся треугольники при такой триангуляции максимально приближаются к равносторонним, а каждая из сторон образовавшихся треугольников из проти-

волежащей вершины видна под максимальным углом из всех возможных точек соответствующей полуплоскости. Интерполяция выполняется по образованным ребрам.

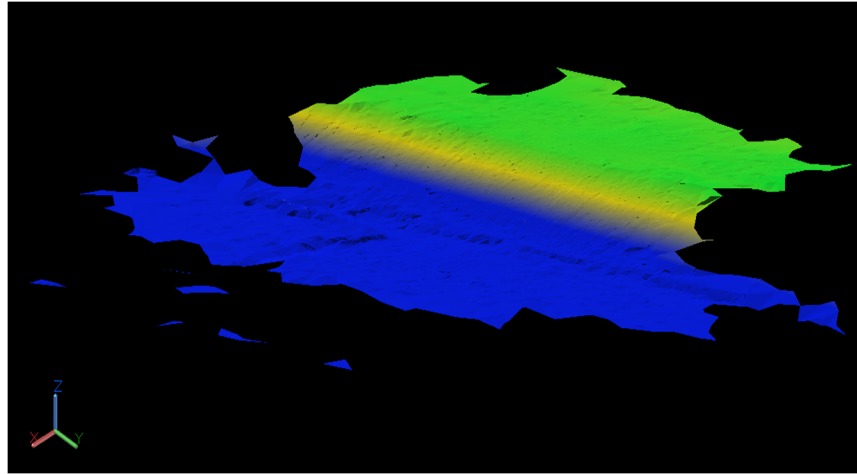


Рисунок 2.22 – Поверхность, построенная в ПК TerraSolid

Отличительной особенностью и преимуществом триангуляционной модели является то, что в ней нет преобразований исходных данных. С одной стороны, это не дает использовать такие модели для детального анализа, но с другой стороны, исследователь всегда знает, что в этой модели нет привнесенных ошибок, которыми грешат модели, полученные при использовании других методов интерполяции. Немаловажен и тот факт, что это самый быстрый метод интерполяции.

После построения поверхностей необходимо перейти к сравнительному анализу поверхностей между циклами: сравниваются 1-й и 2-й цикл, 2-й и 3-й цикл, 1-й и 3-й цикл результатов построения цифровых поверхностей.

Сравнив поверхности 1-го и 2-го циклов лазерного сканирования, получена цифровая поверхность, которая отображает линейные отклонения между поверхностями и окрашивает их в соответствующие цвета (красный – зеленый – синий). Синий цвет отражает отклонения сравниваемой поверхности от базовой в сторону поднятия (отклонения положительные), красный цвет показывает отклонения срав-

ниваемой поверхности от базовой в сторону опускания (отклонения отрицательные). Зеленый цвет показывает участки, в которых отклонения минимальные (до 5 см) (рисунок 2.23).

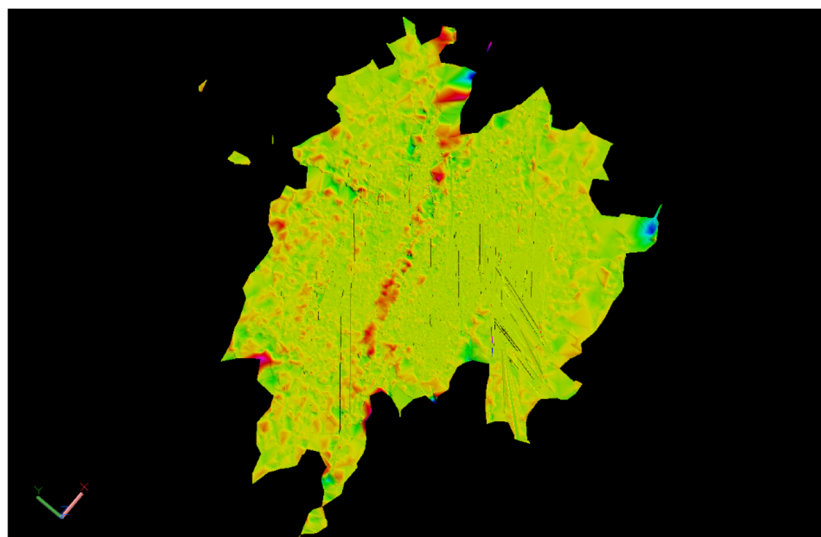


Рисунок 2.23 – Поверхность, полученная при сравнении поверхностей 1-го и 2-го циклов наблюдений



Рисунок 2.24 – Отклонения сравниваемых поверхностей

На рисунке 2.24 представлено числовое отображение отклонений сравниваемых поверхностей, которые были получены в ходе автоматической операции мо-

дуля TerraModeler программного комплекса TerraSolid. Числовые выражения отклонений, представленные на цифровой поверхности, окрашены в соответствующие цветовые оттенки.

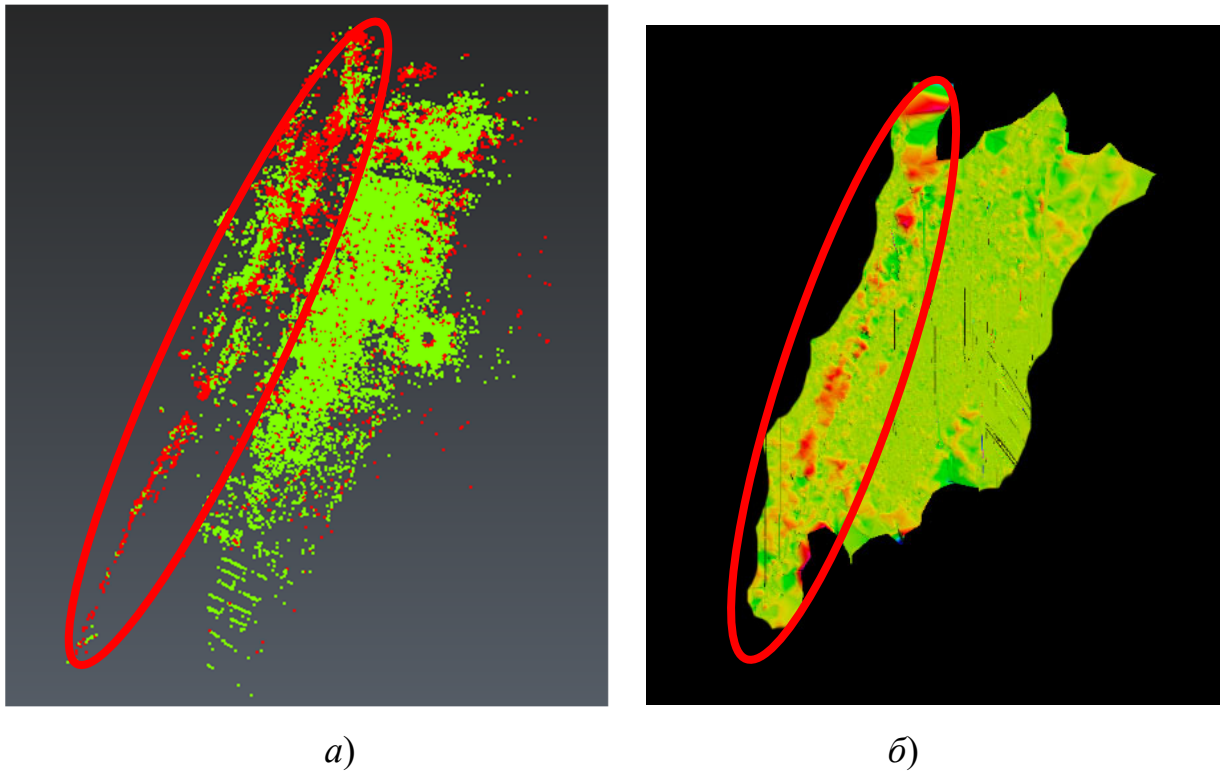
Был произведен расчет по среднему значению отклонений, который составил – 28 мм.

Далее весь алгоритм сравнительного анализа повторяется еще два раза, но уже сравниваются циклы 2 и 3, 1 и 3. По результатам полученных данных подведен итог сравнительного анализа:

1) среднее значение отклонений при сравнении 2-го и 3-го циклов составил – 25 мм, при сравнении 1-го и 3-го циклов – 27 мм;

2) анализируя цифровые поверхности, полученные при сравнении данных НЛС разных циклов сканирования, которые отображают отклонения в виде цветовой раскраски, отметим, что в теле дамбы и основании отсутствуют участки с красным и синим оттенками. Это свидетельствует об отсутствии смещений и деформаций. Крупные отклонения присутствуют на поверхности и распределены они на участке дренажной канавы, поверхности которой подвергались постоянным изменениям в связи с очисткой дренажной канавы. Следовательно, наибольшие отклонения были выявлены в зоне проведения чистки в водоотводной канаве. Этот результат был подтверждён при сравнительном анализе, который производился в ПК 3DReshaper (рисунок 2.25);

3) результаты сравнительного анализа показали, что данные, полученные в ПК TerraSolid, являются наиболее корректными и достоверными, чем данные, полученные в ПК 3DReshaper. Это связано с тем, что в ПК TerraSolid используются только точки земной поверхности. Процесс классификации точек исключает наличие шумовых точек, в том числе мелкой растительности. В ПК 3DReshaper есть вероятность присутствия точек мелкой растительности, так как процесс фильтрации осуществлялся по значению интенсивности отраженного сигнала, что не гарантирует отсутствия шумовых точек мелкой растительности.



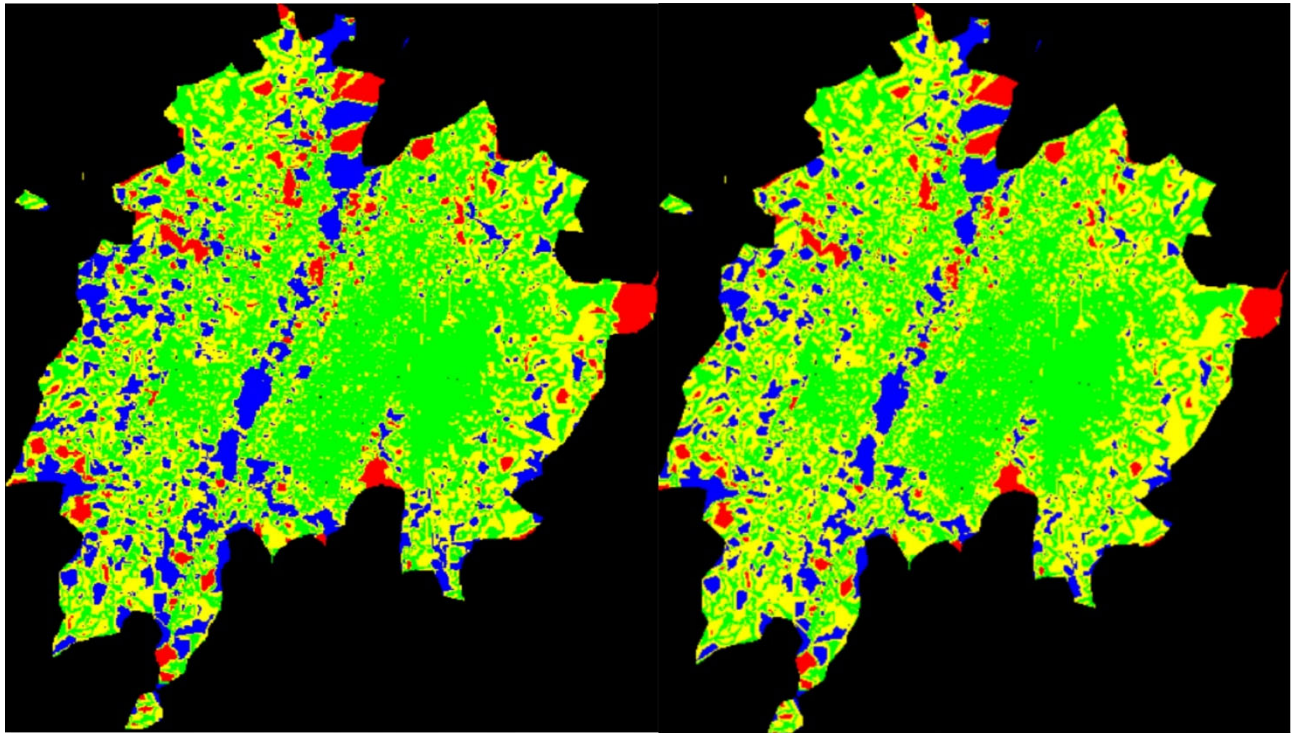
участки моделей без отклонений
 участки с отклонениями

Рисунок 2.25 – Отображение отклонений при сравнительном анализе ТЛО и цифровых поверхностей: *а)* результаты анализа, полученные в ПК 3DReshaper; *б)* результаты анализа, полученные в ПК TerraSolid

2.6 Анализ однородных областей поверхностей

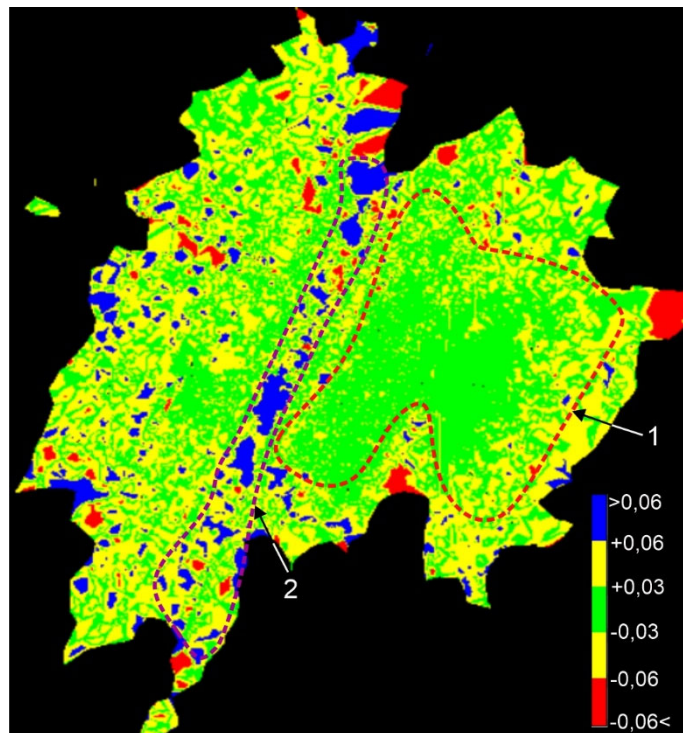
После создания цифровых сеточных поверхностей сравниваем поверхности для первого и второго циклов, второго и третьего циклов, а также первого и третьего циклов сканирования (рисунок 2.26). На этих поверхностях можно выделить однородные области (область 1 на рисунке 2.26, *в*) и области с неоднородными формами, например, область 2 на рисунке 2.26, *в*.

Вторая область (см. рисунок 2.26, *в*) соответствует дренажной канаве, в которой проводились работы по очистке и частично обваловке. Поверхность отклонений представляет из себя сеточную модель (DEM) (см. рисунок 2.24), в узлах которой находится разница отметок в этих узлах.



a)

б)



в)

Рисунок 2.26 – Поверхности отклонений:
а) 1 – 3 циклы; б) 2 – 3 циклы; в) 1 – 2 циклы

Эти сеточные поверхности можно анализировать с помощью математической статистики.

Анализ деформационных процессов. Выявленные площадные деформации превышают допуски на точность измерений для контрольных точек грунтовых сооружений IV категории – ± 15 мм в плане и ± 10 мм по высоте [12]. Здесь нужно иметь в виду, что определение деформаций методом лазерного сканирования эффективно на гладких обработанных поверхностях [70]. Поверхность земляной дамбы представляет собой насыпную поверхность из щебня (рисунок 2.27, а), по которой «пробегают» лучи лазера сканера. При каждом сканировании луч лазера попадает в разные точки поверхности (рисунок 2.27, б), поэтому прямое сравнение поверхностей всегда будет иметь отклонения, которые связаны с размером кусков материала тела дамбы.

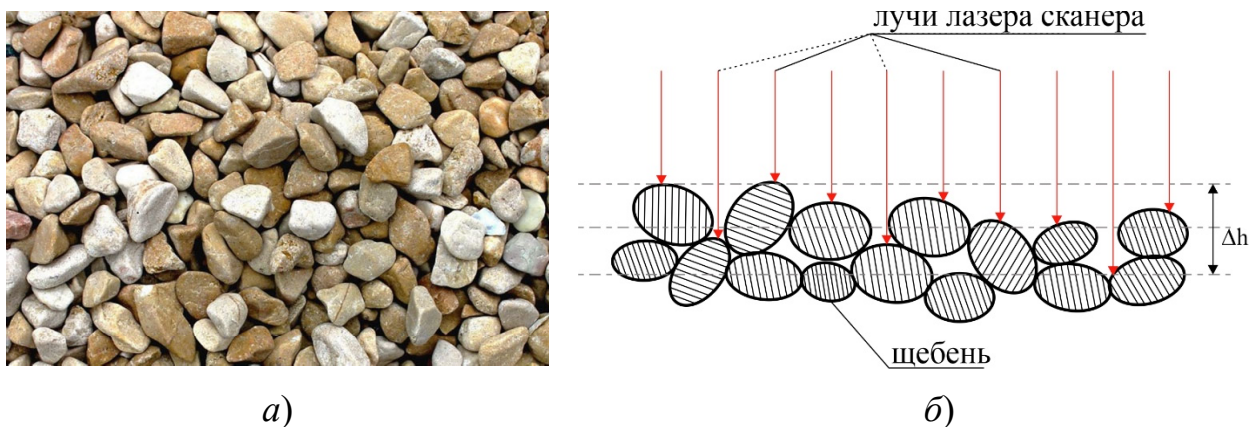


Рисунок 2.27 – Поверхность и сечение поверхности лазерным лучом:

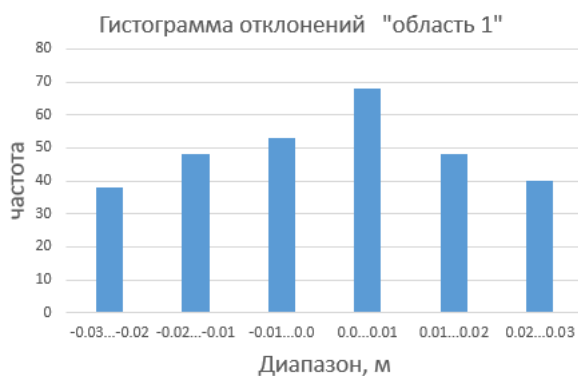
а) поверхность дамбы; б) сечение поверхности дамбы

В механике есть понятие – шероховатость поверхности [14], которое характеризует микроформы рельефа поверхности. Наиболее значимыми критериями шероховатости являются R_{\max} – максимальная высота профиля поверхности и R_a – среднее арифметическое значение отклонения профиля. Для поверхностей с более крупными формами рельефа, такими как поверхности земляных дамб, вводится понятие гранулометрический состав [13], который определяет размер частиц и их процентное со-

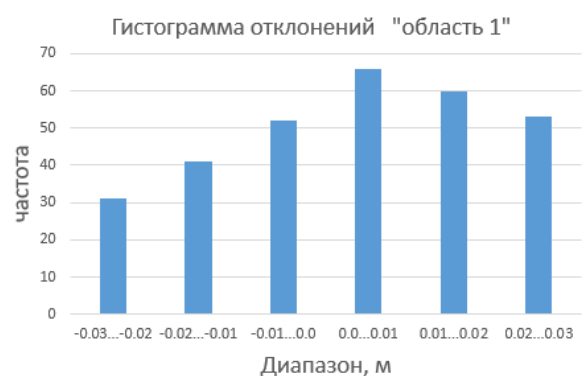
держание в теле дамбы. При достаточно большом числе одинаковых кусков и большом числе измерений $R_{\max} = \Delta h$ (см. рисунок 2.27, б). Для дамбы № 1, которая является объектом исследования, средний размер кусков равен 60 мм. Разность двух сканов одной и той же поверхности должна давать случайную «мелкосопочную» поверхность с разбросом значений $\pm \frac{\Delta h}{2} = \pm 30$ мм, а среднее арифметическое отклонение поверхностей R_a должно стремиться к нулю. Это свидетельствует о том, что деформаций такой поверхности не было. Это утверждение подтверждается статистикой разностей поверхностей между разными датами съемки (таблица 2.3 и рисунок 2.27). Область 1 – это однородный по отклонениям участок откоса дамбы, на котором не производились работы в данный период (рисунок 2.26, в).

Таблица 2.3 – Отклонения поверхностей участка сканирования

Съемки	Область	Среднее арифметическое, мм	Среднее медианное, мм
1 – 2	Весь участок	28	10
	Область 1	–1	0
2 – 3	Весь участок	25	8
	Область 1	3	1
1 – 3	Весь участок	27	12
	Область 1	3	3



а)



б)

Рисунок 2.27 – Гистограмма разностей поверхностей в «области 1»:

а) поверхности 2-3; б) поверхности 1-3

Распределение отклонений на участке «область 1» является однородным с наибольшим количеством точек в диапазоне ± 10 мм. Если проанализировать средние отклонения поверхностей по всей поверхности и однородному участку «область 1», можно сделать выводы, что средние отклонения для всего участка больше, чем для однородной области, что связано с проведением горнотехнических работ и работ по очистке дренажной канавы. Если анализировать однородную «область 1» откоса дамбы, на которой работы не проводились (см. таблицу 2.3), то по значению среднего арифметического, которое в данном случае коррелирует с медианным средним, можно судить о наличии деформационных процессов. Если среднее отклонение между двумя поверхностями по участку (однородной области) меньше допуска на точность определения превышений точек грунтовых сооружений IV категории [12] ± 10 мм, то деформационных процессов в теле дамбы нет.

Эти выводы подтверждаются нивелировкой по профильной линии, расположенной на гребне дамбы.

Резюмируя вышесказанное, можно сделать следующие выводы:

1 С помощью метода молдинга можно из ТЛО классифицировать точки поверхности земли и отделить их от растительности и таким образом получить «чистую» поверхность дамбы.

2 Сравнение «щебеночных» поверхностей на две даты необходимо проводить в два этапа. На первом этапе выполнить формальную классификацию отклонений по пяти или семи диапазонам для выявления однородных по отклонениям областей, связывая их с гранулометрическим составом объекта. Затем анализируются средние отклонения в каждой однородной области и делается вывод о наличии и величине деформаций.

3 Если разности поверхностей содержат участки с закономерно увеличивающимися областями – это однозначно свидетельствует о деформационных процессах в теле дамбы или проведении горнотехнических работ. Но эти области разделить достаточно просто, по нарядам на выполнение работ на этих участках.

2.7 Выводы по второму разделу

Для проведения геодезических наблюдений за деформациями ограждающих дамб закладываются специальные наблюдательные станции, на которых периодически проводятся инструментальные наблюдения. Наблюдательные станции, как правило, состоят из профильных линий, по которым расположены опорные и рабочие реперы.

Проведение геодезических наблюдений в системе мониторинга безопасности ограждающих гидротехнических сооружений позволяет своевременно выявить возникшие деформации, оценить устойчивость дамб и разработать мероприятия для предотвращения аварийных ситуаций.

Разработана методика геодезического мониторинга за состоянием насыпных дамб с применением технологии наземного лазерного сканирования (НЛС), которая позволяет по данным НЛС применять и точечные методы, и площадные, что значительно увеличивает объем получаемой информации и дает наиболее полное и наглядное представление о распределении смещений и деформаций по всей поверхности исследуемого объекта или его части. Особую актуальность данная методика приобретает, когда имеют место активные деформации, ограничивающие безопасный доступ к исследуемому участку.

При сравнении ТЛО, полученных при разных циклах сканирования, программный комплекс TerraSolid показал наиболее эффективную, точную и качественную обработку ТЛО. Это связано с обработкой ТЛО по методу молдинга, преимуществом которого является то, что одновременно с построением поверхности рельефа, выполняется селекция лазерных точек, т. е. выделение тех из них, которые принадлежат этой поверхности, и удаление точек растительности.

В [12, 13] для земляных сооружений определен IV класс точности для маркированных точек ± 10 мм по высоте и ± 15 мм в плане – этим требованиям вполне удовлетворяет результат контроля положения реперов с помощью электронного тахеометра и наземного лазерного сканирования.

Сравнение «щебеночных» поверхностей на две даты необходимо проводить в два этапа. На первом этапе выполнить формальную классификацию отклонений по пяти или семи диапазонам для выявления однородных по отклонениям областей, связывая их с гранулометрическим составом объекта. Затем, анализируя средние отклонения в каждой однородной области, делается вывод о наличии и величине деформаций.

Если разности поверхностей содержат участки с закономерно увеличивающимися областями, это однозначно свидетельствует о деформационных процессах в теле дамбы или проведении горнотехнических работ.

3 УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МЕТОДИКА ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Гидротехнические сооружения являются весьма ответственными сооружениями, поэтому аварии (прорывы плотин или ограждающих дамб хвостохранилищ) могут привести к катастрофическим последствиям с нанесением значительного ущерба. В связи с этим гидротехнические сооружения золоотвала ТОО «Главная распределительная энергостанция Топар», как объекты стратегической важности, подвергаются периодическому (не реже одного раза в пять лет) комплексному мониторингу, в том числе геодезическому [51].

Методика геодезического мониторинга предполагает несколько этапов. Первый этап заключается в том, чтобы для определения участков, за которыми необходимо наблюдать, следует выполнить геотомографические исследования дамбы, которые позволят выявить участки с неоднородной структурой, обводненные участки и другие дефекты структуры.

3.1 Геотомографические исследования тела дамбы № 1

Геотомографические (георадарные) исследования – это геофизический способ получения информации о структуре и характере верхнего слоя исследуемой поверхности, не требующий механического и разрушающего воздействия. Полевые работы на плотине по георадарной съемке грунтов выполнялись с помощью геотомографической установки (георадар) RAMAC фирмы MALAGEOSeance. Обработка полученных георадарных данных проводилась в специализированном программном комплексе RadExplorer [72].

Суть метода георадиолокации заключается в том, что он один из самых современных методов неразрушающего исследования неоднородностей и аномалий, расположенных в глубине исследуемого массива. Он предназначен для обнаружения объемов с контрастной по отношению к окружающей среде диэлектрической проницаемостью. Исследуемой средой может быть земная поверхность (отсюда

наиболее распространенное название – георадар), вода, стены зданий и т. п. Упрощённая схема геотомографа Mala GeoScience, применяемого в ходе данных исследований и представляющего собой цифровое модульное устройство, приведена на рисунке 3.1.

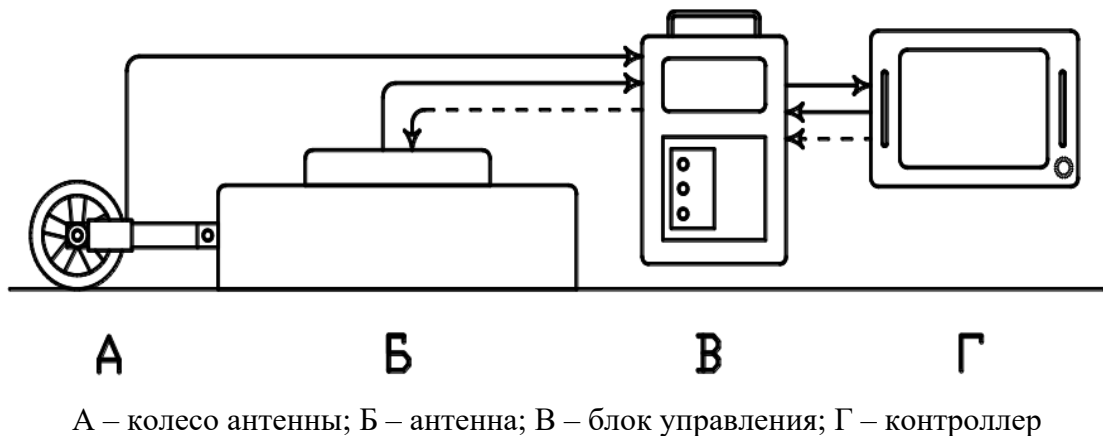


Рисунок 3.1 – Схема геотомографической системы

Соотношение энергии пройденного и отражённого импульса прямо пропорционально отношению значений диэлектрической проницаемости породы, слагающей объект, и породы, его окружающей. Диэлектрическая проницаемость является характеристикой вещества, отражающей скорость распространения в нём электромагнитной волны и её поведение на границе раздела сред. Аналогичной характеристикой в оптике является показатель преломления среды.

Отраженный сигнал, достигая приёмника в антенном блоке, регистрируется при формировании записи диаграммы сигнала. Запись формируется центральным процессором в течение указанного интервала времени, определяющего глубину сканирования. При этом с заданной частотой дискретизации, влияющей на плотность измерений, регистрируется уровень сигнала на приёмнике.

Во время измерения антенный блок перемещается с заданным шагом вдоль массива по линии, образующей георадарный профиль (рисунок 3.2).

После компьютерной обработки радиограммы с учётом физических свойств грунтов насыпной плотины и основания получают геологофизический разрез по

направлению сканирования. При формировании разреза происходит пересчет времени возвращения сигнала в расстояние, а его амплитуды в цветовую величину согласно выбранной палитре. Расстояние пересчитывается по времени двойного прохождения радиосигнала от антенны до объекта и обратно с учётом скорости прохождения электромагнитной волны в исследуемой среде, зависящей от её диэлектрической проницаемости.

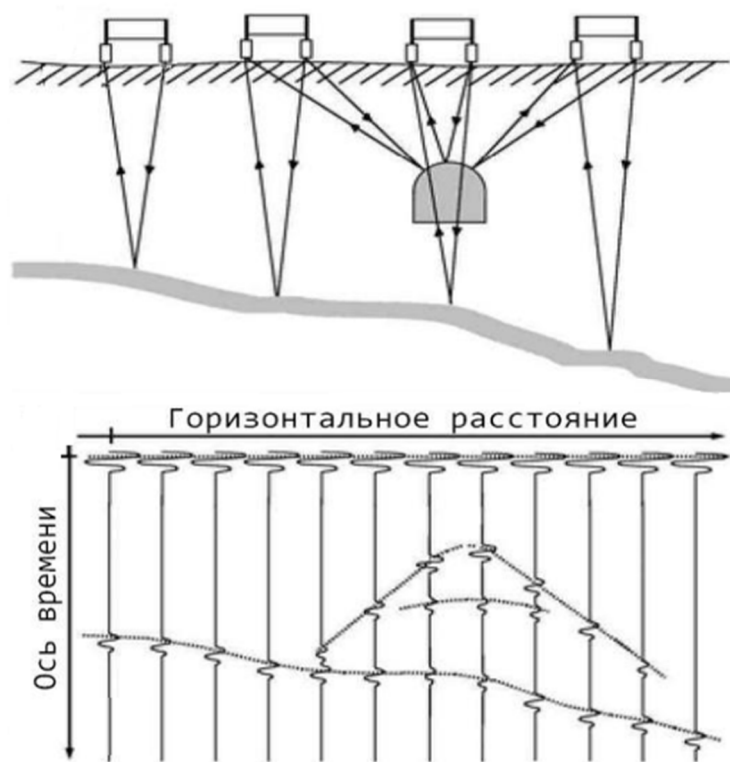


Рисунок 3.2 – Принцип работы геотомографической системы

Кроме того, вертикальная ось геофизического разреза имеет масштаб времени и для перевода в масштаб расстояний требуется априорная информация о скорости электромагнитных волн в исследуемой среде.

В частности, проводимые исследования позволяют соотнести масштаб времени с масштабом расстояний, так как известно положение целевого перемещаемого объекта, из которого находится путь, пройденный радиоволной в массиве, из чего можно рассчитать скоростные характеристики среды, используемые в последующих измерениях.

Обработка полученных данных осуществлялась в специализированной системе RadExplorer, производства «DECO-Geophysical» [29].

При этом подбираются оптимальные параметры процедуры обработки, которая в общем случае делится на предварительную и окончательную обработку.

Для исследования структурной нерешённости насыпного сооружения на конечном этапе обработки применялась процедура полосовой фильтрации высокочастотных компонентов. При этом полученные томограммы отражают распределение мелкодисперсных неоднородностей в теле плотины, которыми могут быть как трещины, так и мелкие включения. При этом полученные данные говорят, что соотношение таких неоднородностей в нижнем слое дамбы выше, чем в верхнем [41].

Результатом обработки данных является геофизические профили по пикетам с характерными осями синфазной составляющей (рисунок 3.3–3.5). При этом с учётом рельефа на глубине эффективного зондирования выделены субгоризонтальные отражающие границы геологических разностей.

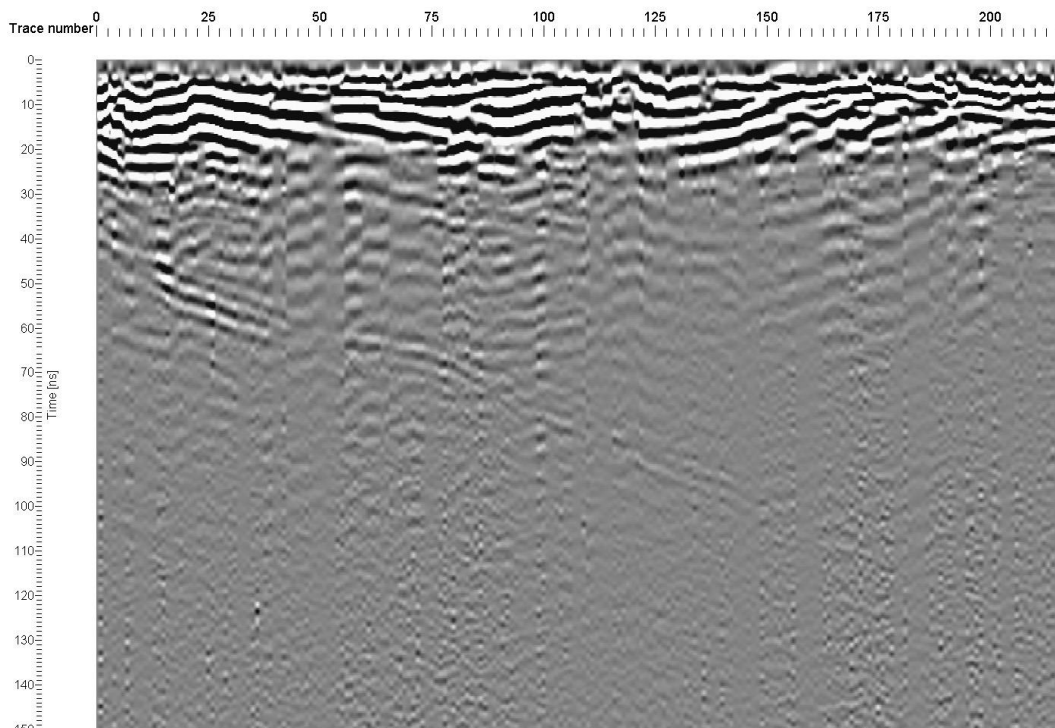


Рисунок 3.3 – Результаты первичной обработки по георадарному профилю на ПК 8+20

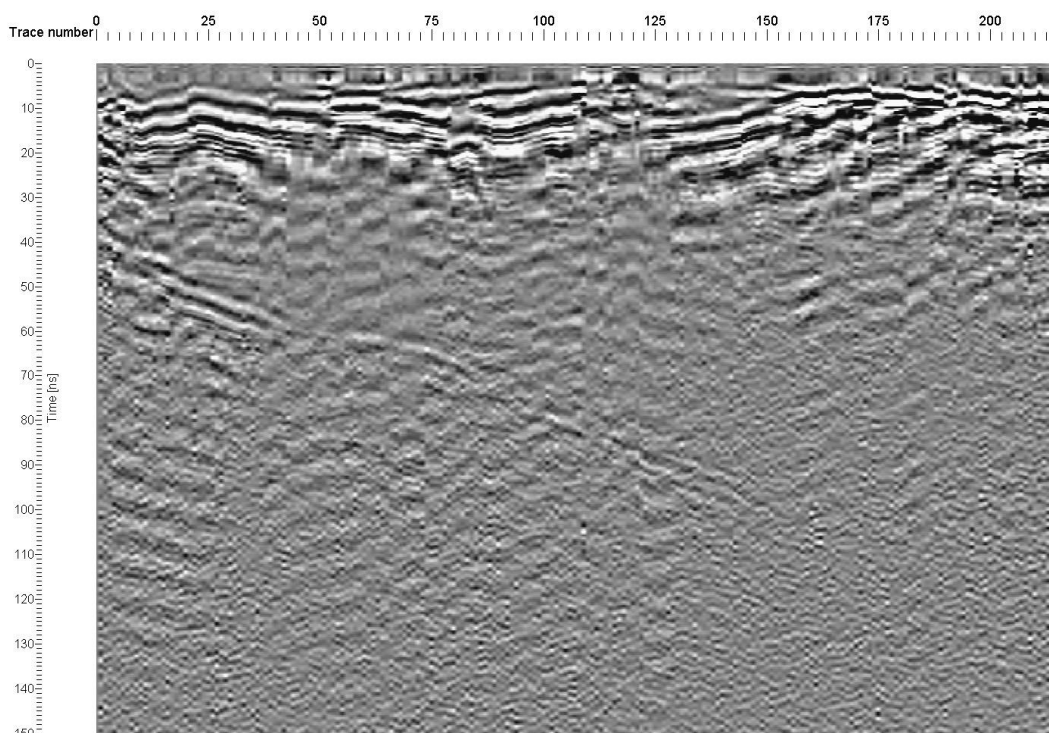


Рисунок 3.4 – Результаты окончательной обработки георадарного профиля на ПК 8+20

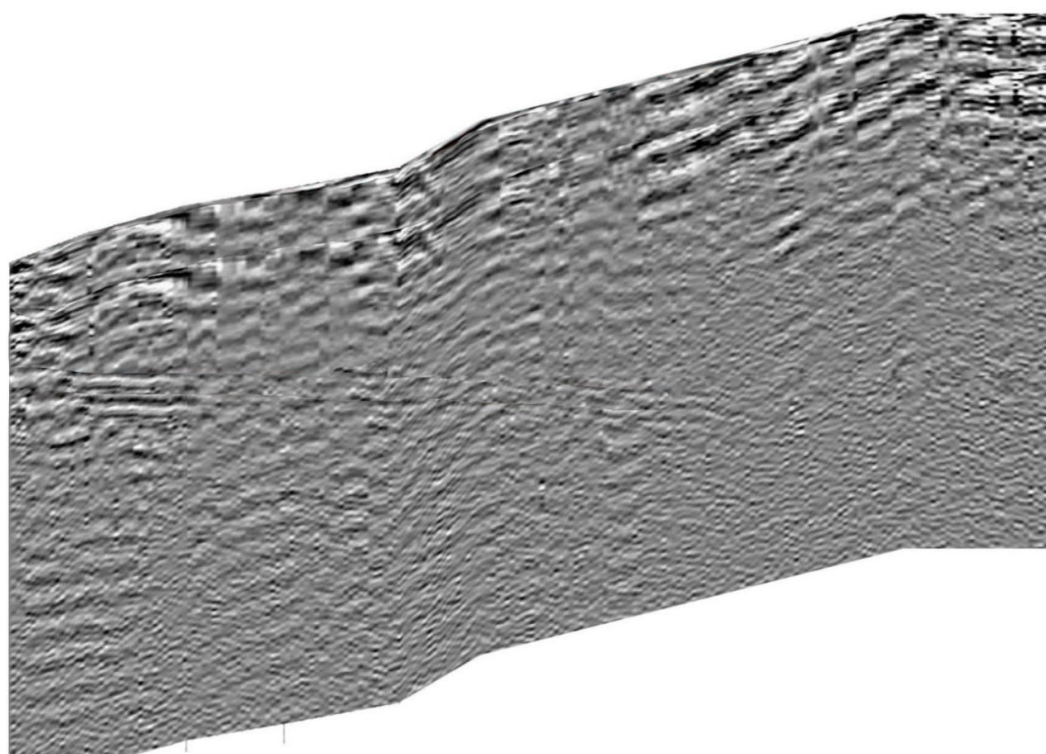


Рисунок 3.5 – Анализ георадарного профиля с привязкой к рельефу на ПК 8+20

По результатам геотомографических исследований необходимо отметить, что наличия пустот и неоднородностей в теле плотины и в основании не выявлено.

Дальнейшим этапом геодезического мониторинга является проведение наблюдений для определения внешних нарушений тела дамбы, а также прогнозирование возникновения возможных деформаций и смещений.

3.2 Обследование гидротехнических сооружений методом аэрофотосъемки

В связи с переходом на системное автоматизированное обследование объектов, в частности насыпных гидротехнических сооружений, существенно изменились методы наблюдений: многие организации отказались от традиционных технологий сбора информации и перешли на новые и современные способы получения пространственных данных [48].

Беспилотные авиационные системы (БАС) находят всё более широкое применение в разных сферах научной и хозяйственной деятельности. На сегодняшний день современные технологии позволяют выполнять с помощью БАС аэрофотосъёмку (АФС), упрощая процесс получения точных пространственных данных.

БАС достойно заняли свою нишу при выполнении аэрофотосъёмки небольших территорий до 20 км². Этому способствуют недостатки двух традиционных способов измерений: космической съёмки и съёмки с пилотируемых летательных аппаратов. Данные спутниковой съёмки позволяют получать снимки с максимальным доступным разрешением 0,5 м, что недостаточно для построения крупномасштабных топографических карт и планов. Аэрофотосъёмка, выполняемая с самолётов и вертолётов, требует больших затрат (аренда, стоимость топлива и т. д.). Таким образом, применение БАС для съёмки на небольших высотах с целью получения снимков высокого разрешения становится экономически целесообразной. Оперативность выполнения полевых работ с применением БАС позволяет осуществлять рекогносцировку местности, обследование состояния ограждающих дамб.

В рамках научно-исследовательской работы была применена методика аэрофотосъёмки БАС в системе геомониторинга для обследования состояния огражда-

ющей дамбы № 1. В начале октября 2021 года была выполнена аэрофотосъёмка с БАС DJI Phantom 3 Pro.

Для проведения обследования был выбран участок протяженностью 820 м на ограждающей дамбе № 1.

Время проведения этих работ выбиралось с учётом погодных условий, которые должны соответствовать требованиям инструкции. Основной помехой для работы являлся ветер, который также поднимал частицы зольной пульпы, создавая густое облако. Это облако ограничивало видимость до 15–20 м. Для планирования маршрута съёмки применялось программное обеспечение DJI GS Pro, позволяющее в режиме 3D Map оперативно запрограммировать параметры полёта, наметив на космическом снимке лишь периметр съёмки и задав высоту и степень перекрытия снимков. Первая аэросъёмка была проведена на высоте 50 м.

Помимо этого, осуществлялись GNSS наблюдения на контрольных (опорных) точках гребня дамбы. Для построения модели на основе снимков с БАС использовалось программное обеспечение PhotoScan.



Рисунок 3.6 – Фотоснимок участка дамбы, сделанный квадрокоптером DJI Phantom 3 Pro

Обработка данных в PhotoScan автоматизирована, что позволяет в короткий срок овладеть навыками работы в этой программе и следить лишь за правильностью выставленных параметров обработки. Окончательным этапом обработки данных в этой программе является получение трехмерных данных, которые представлены в виде точечной модели, например, в формате LAS, матрица высот, цифровая модель в формате TIN и ортофотоплан. При значительных объемах выходных данных предусмотрена возможность получать результат, разбитый на привязанные блоки.

В результате выполненного полёта было сделано 790 снимков. Протяжённость полосы съёмки в первом случае в длину составила порядка 820 м и порядка 80 м в ширину. В качестве опорных точек на земле применялись белые пластмассовые одноразовые тарелки диаметром 165 мм, закреплённые дюбелями, которые уверенно опознаются на снимках и позволяют центрировать на их центрах маркеры в программе обработки снимков с точностью одного пикселя, что соответствует 2-3 см.

В результате обработки полученных фотоснимков были созданы плотные облака точек, карты высот, цифровые модели и ортофотопланы. В ходе обработки данных съёмки выполнялось построение плотной точечной модели с предварительной ориентацией матрицы на основании навигационных координат центров фотографирования, где точность составляет несколько метров. И лишь после импорта в программу подсчитанных координат опорных точек и точной расстановки их с помощью специальных маркеров мы получаем точную пространственную модель снимаемого участка в системе координат WGS 84.

В дальнейшем, загрузив все данные по съёмке, появляется возможность перейти в местную систему координат, используя необходимую проекцию и датум. Из отчёта PhotoScan по обработке данных съёмки общая ошибка по опорным точкам составила 3,4 см (2,5 см в плане и 2,3 см по высоте), при этом разрешение съёмки составило 2,59 см/пикс. Эти цифры характеризуют точность построения цифровой модели местности.

После проведения полевых и камеральных работ результатом аэрофотосъемки стала трехмерная поверхность насыпной дамбы. Полученная поверхность необходима для последующих фильтрационных расчетов и расчетов устойчивости гидротехнического сооружения. Кроме того, по полученным фотоснимкам был произведен визуальный осмотр тела дамбы на наличие внешних нарушений целостности тела дамбы, скопления воды у основания низового откоса.

3.3 Фильтрационные расчеты и расчет устойчивости сооружения по трехмерной модели дамбы

Устойчивость ограждающих и разделительных дамб хвостохранилищ определяется совокупностью геологических, гидрогеологических и техногенных факторов, из которых наибольшее влияние оказывают следующие: физико-механические характеристики грунтов и хвостов; технология возведения и эксплуатации сооружения; характер основания; гидродинамические, гидростатические, сейсмические и динамические силы.

При расчетах устойчивости откосов ограждающих дамб хвостохранилищ необходимо учитывать, что физико-механические характеристики тела дамбы претерпевают существенные изменения в процессе строительства и эксплуатации сооружения за счет неравномерности намыва и заполнения секций золоотвала, изменения пьезометрического уровня воды, фильтрации и выноса глинистых частиц из тела дамбы, температурного режима, наращивания высоты дамбы, влияния транспортных средств и т. п.

С геомеханической точки зрения ограждающее намывное сооружение представляет собой водонасыщенный массив, который находится в динамическом состоянии. В результате намыва отходов происходит рост ограждающего сооружения в высоту, что приводит к деформациям намывного массива. С появлением прудка и по мере роста высоты сооружения в нем происходит изменение фильтрационного режима.

В процессе строительства и эксплуатации насыпных ограждающих дамб сталкиваются с различными видами фильтрации воды. Различают фильтрационные потоки допустимые, которые в случае принятия соответствующих мер не являются опасными для сооружения, и недопустимые, которые представляют угрозу для устойчивости сооружения. Возникновению опасных сосредоточенных фильтрационных потоков могут способствовать недостаточное и нетщательное уплотнение отсыпаемого грунта; таяние льда, попавшего в насыпь во время отсыпки грунта; неравномерная осадка основания.

На устойчивость насыпной дамбы значительное влияние оказывает обводненность основания, связанная с повышением уровня грунтовых вод. Это приводит к снижению прочностных характеристик пород основания. Для оценки устойчивости откосов ограждающих дамб требуется детальное изучение всех факторов, влияющих на состояние насыпного сооружения, при этом решающее значение приобретает выбор способа расчета, который отвечал бы конкретным гидрогеологическим условиям и физико-механическим свойствам пород, слагающих тело дамб и их оснований.

Разнообразие инженерно-геологических и гидротехнических условий, технических решений по возведению ограждающих дамб и способов их наращивания в процессе эксплуатации золоотвалов, намываемых гидротранспортом, предопределило наличие различных способов расчета устойчивости откосов насыпных сооружений [1, 50], учитывающих конкретные случаи нарушения стабильности ограждающих дамб. Производится оценка состояния отдельных элементов ограждающего сооружения: устойчивость низового откоса, откоса дамбы и отдельных плоских прослоек дамбы с глинистым экраном.

Золошлаковые отвалы занимают значительную территорию с разной топографией земной поверхности, различными условиями намыва и сроком эксплуатации, имеющую общее для всех ограждающих и разделительных дамб основание. Поэтому необходимо при расчетах рассматривать влияние на состояние ограждающих дамб обводненности пород тела дамб и грунтов основания и дополнительных нагрузок со стороны шлакоотвала.

Аэрофотосъемка позволяет получать большой объем пространственных данных, представленный множеством точек в трехмерном пространстве, что позволяет получить полную или частичную трехмерную модель и визуализацию обследуемого объекта (рисунок 3.7).

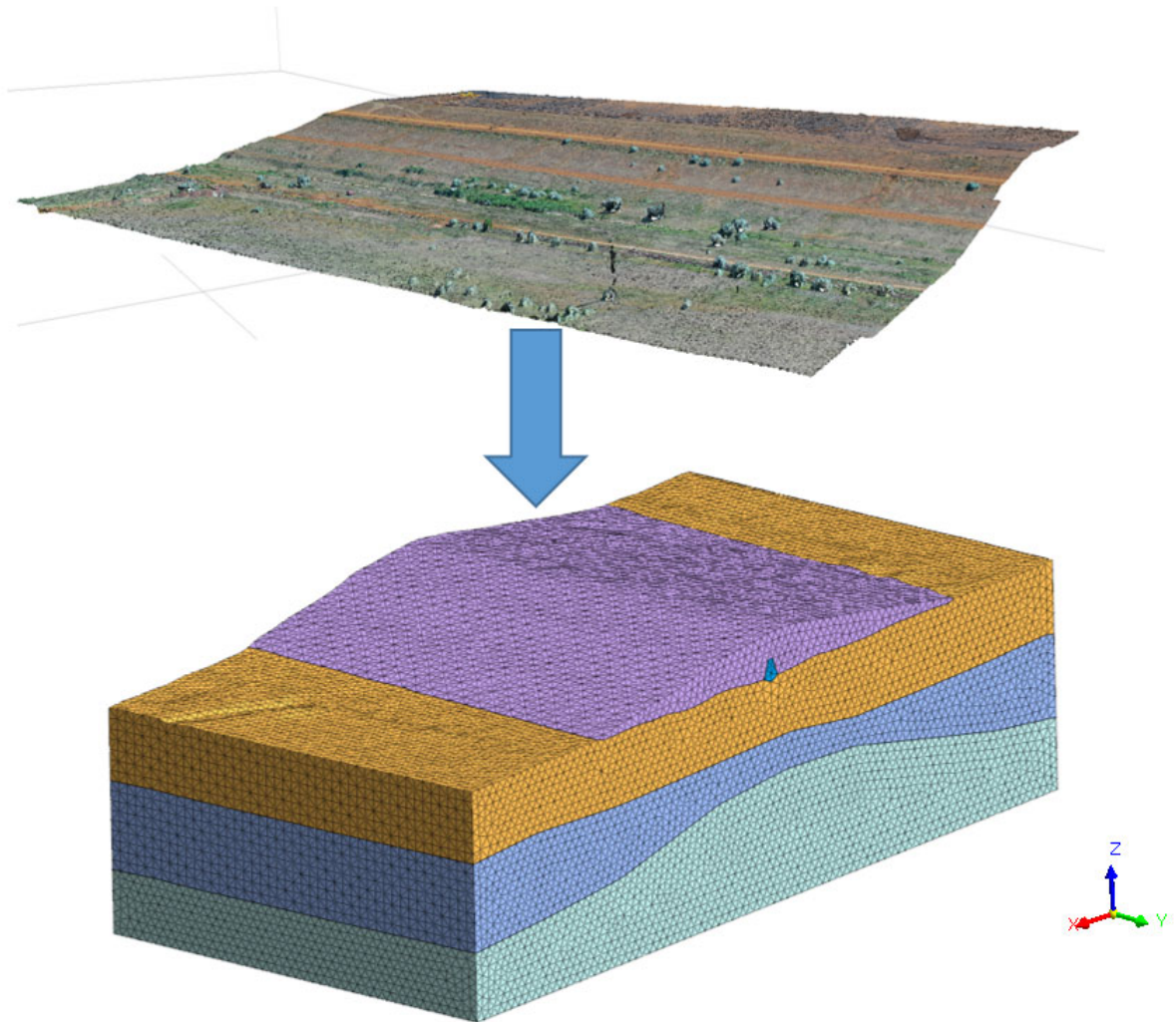


Рисунок 3.7 – Трехмерная модель дамбы № 1 золоотвала
ТОО «Главная распределительная энергостанция Топар»

Полученные трехмерные данные позволяют провести расчет устойчивости и анализ фильтрации. Данные расчеты производились в программном комплексе Midas GTS NX, который разработан специально для моделирования с применением метода конечных элементов. GTS NX призван помочь инженерам в выполнении

пошаговых расчетов устройства выемок, насыпей, возведения сооружений, нагружения и других воздействий, оказывающих непосредственное влияние на проектирование и строительство. В программе реализован учет различных параметров при моделировании реальных объектов.

В среде программы были реализованы линейные и нелинейные методы расчета (линейный/нелинейный статический расчет, линейный/нелинейный динамический расчет, расчет фильтрации и консолидации, расчет устойчивости откоса) и различных сопряженных методов расчета (фильтрации и напряженно-деформированного состояния, напряженно-деформированного состояния и устойчивости откоса, фильтрации и устойчивости откоса, и нелинейный сопряженный расчет устойчивости откоса).

В расчетном случае устойчивость плотины проверяется при полном уровне воды с помощью 3D-анализа фильтрации. Анализ просачивания можно разделить на «Анализ установившегося состояния» и «Анализ переходных процессов». В данном расчетном случае производится анализ установившегося состояния, который предполагает, что грунт водонасыщен. Модель представляет собой участок плотины высотой 30 м, шириной 150 м и длиной 100 м.

Анализ проводится для оценки устойчивости плотины при максимальном уровне воды. Чтобы гарантировать устойчивость плотины, в теле плотины установлено глинистое ядро. Также в модели было воссоздано основание плотины согласно результатам инженерно-геологических изысканий, указанным в проекте строительства дамбы.

Для геометрического моделирования в GTS NX могут быть использованы различные библиотеки конечных элементов. Различные элементы могут быть использованы для линейных и нелинейных расчетов напряженно-деформированного состояния, фильтрации, консолидации и других видов сопряженных расчетов. При этом важно понимать, что используемые элементы и их соответствующие свойства необходимы для того, чтобы корректно проводить расчеты. Так как модель имеет трехмерный вид, то применяются элементы в форме тетраэдра, пентаэдра или гек-

саэдра, которые могут иметь 4/5/6/8/10/13/15/20 узлов. Пентаэдры могут иметь форму пирамиды или призмы. Трехмерными элементами являются элементы твердого тела.

После того, как произведено построение аналитической модели, необходимо задать нагрузки, которые будут воздействовать на нее.

Основными нагрузками и граничными условиями модели являются собственный вес и нагрузка воды, которая создает фильтрационный поток, поровое давление в теле дамбы.

Гравитация используется для моделирования собственного веса или силы инерции сооружения, и может быть задана на все элементы, имеющие массу. Действие гравитации задается на все активные элементы. Гравитация также автоматически задается на элементы, добавленные на этапе возведения. Подобным же образом гравитация автоматически удаляется, когда элементы становятся неактивными. В расчетах с учетом порового давления собственный вес определяется как дополнительная внешняя сила, зависящая от степени водонасыщения.

В GTS NX может быть учтено давление воды, соответствующее заданному для модели положению уровня воды. Давление воды учитывается в двумерных задачах как давление на ребро, а в трехмерных задачах – как давление на поверхность. Значение давления, соответствующее давлению воды, определяется следующим образом:

– давление равно поровому давлению, определенному на целевом ребре или поверхности;

– давление равно гидростатическому давлению, соответствующему заданному положению уровня воды, $Z_{phreatic}$:

$$p = \rho_f \cdot g \cdot (z_{phreatic} - z), \quad (3.1)$$

где ρ_f – плотность воды;

g – ускорение свободного падения;

$Z_{phreatic}$ – уровень воды;

z – направление действия силы тяжести.

В GTS NX реализован метод, который позволяет автоматически задавать давление воды на все свободные ребра или поверхности. При этом давление воды автоматически задается только на элементы, которые находятся ниже уровня воды. С другой стороны, возможно также задание давления воды в ручном режиме на необходимые ребра или поверхности.

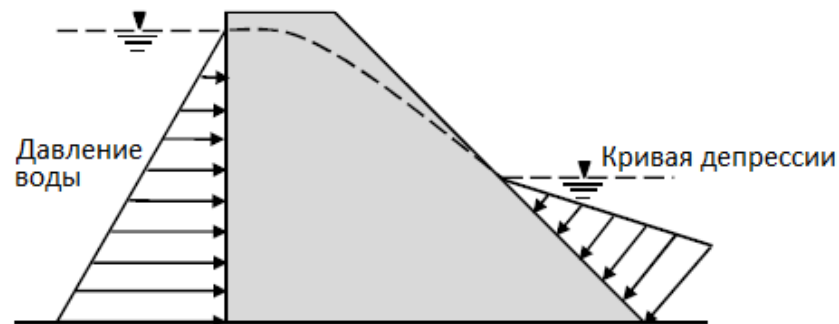


Рисунок 3.8 – Давление воды, автоматически заданное в соответствии с уровнем воды

Устойчивость откоса дамбы или плотины гидротехнического сооружения должна быть проверена по возможным поверхностям сдвига с нахождением наиболее опасной призмы обрушения, характеризуемой минимальным отношением обобщенных предельных реактивных сил сопротивления к активным сдвигающим силам [10].

При расчетах устойчивости откоса ограждающей дамбы учитывается то обстоятельство, что основание дамбы практически всегда находится в увлажненном состоянии в связи с повышением уровня подземных вод и протекающими фильтрационными процессами, поэтому расчеты выполняются со значениями прочностных характеристик при максимальной влажности пород тела дамбы.

Методика и алгоритм расчета фильтрации и устойчивости. Устойчивость насыпных плотин нельзя оценивать без учета фильтрации и просачивания вод. Моделирование течения сквозь пористую среду подчиняется закону Дарси:

$$u = KI, \quad (3.2)$$

где u – скорость фильтрации;

K – коэффициент фильтрации;

I – градиент напора.

В дифференциальном виде это можно представить в виде уравнения:

$$\frac{d}{dx} \left(k_x \frac{dH}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(k_y \frac{dH}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(k_z \frac{dH}{dz} \right) + Q = \frac{d\theta}{dt}, \quad (3.3)$$

где H – пьезометрический напор;

k – коэффициент проницаемости грунта;

Q – расход;

θ – влагосодержание;

t – время.

На решение (3.2) и (3.3) накладываются граничные условия, описывающие поровое давление или условия истечения для расчета фильтрации. Функции от времени используются для условий нестационарной фильтрации. В связи с тем, что золоотвал ТОО «Главная распределительная энергостанция Топар» почти заполнен, дальнейшие расчеты выполнялись для условий стационарной фильтрации при полном заполнении золоотвала.

В программном комплексе GTS NX [52] можно использовать модели разной размерности, как плоские, так и трехмерные. Модели предполагают решение различных задач и использование разных методов. В данном случае использовалась нелинейная модель классического критерия разрушения Мора – Кулона. Модель требует ввода следующих параметров: модуль упругости E , коэффициент Пуассона, угол внутреннего трения и сцепления.

Для моделирования фильтрации и определения напряженно-деформированного состояния дамбы использовались два метода:

1) расчет методом понижения прочности (SRM) основанный на методе конечных элементов (МКЭ), дает наиболее вероятный и точный сценарий разрушения объекта, хотя и требует больших вычислительных ресурсов;

2) метод анализа напряжений (SAM) – численный метод, который позволяет анализировать предварительно заданные круглоцилиндрические поверхности скольжения и может учитывать нелинейные характеристики материалов. Этот метод дает более быстрые, но менее точные результаты.

Двумерная задача. Для моделирования процессов фильтрации совместно с оценкой напряженно-деформированного состояния ограждающей дамбы золоотвала используется решение задачи в двумерной постановке. Первым этапом решения является задание геометрии и свойств материалов дамбы и основания. Дамба золоотвала насыпная, однородная с более плотным ядром, без противофильтрационных экранов. Хотя программный комплекс GTS NX позволяет выполнять расчет по стадиям процесса – в данном случае будем выполнять расчеты исходя из максимального заполнения золоотвала и максимального уровня воды [68].

Вторым этапом выполняются расчеты методами SAM и SRM. Представлены только результаты более точного метода SRM, сравнивая некоторые результаты с методом SAM.

На рисунках 3.9 и 3.10 показаны поровое давление и общий напор.

На рисунке 3.11 показаны скорости фильтрационных потоков, на рисунке 3.12 слева в нижнем бьефе показано расчетное положение точки высачивания, а справа – заданная для расчетов поверхность просачивания, на рисунке 3.13 – депрессионная кривая.

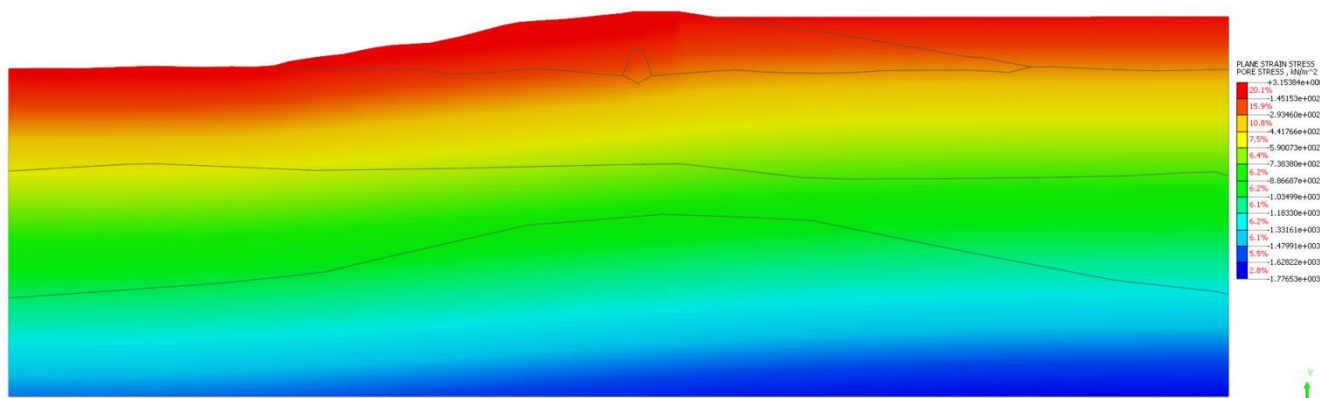


Рисунок 3.9 – Поровое давление

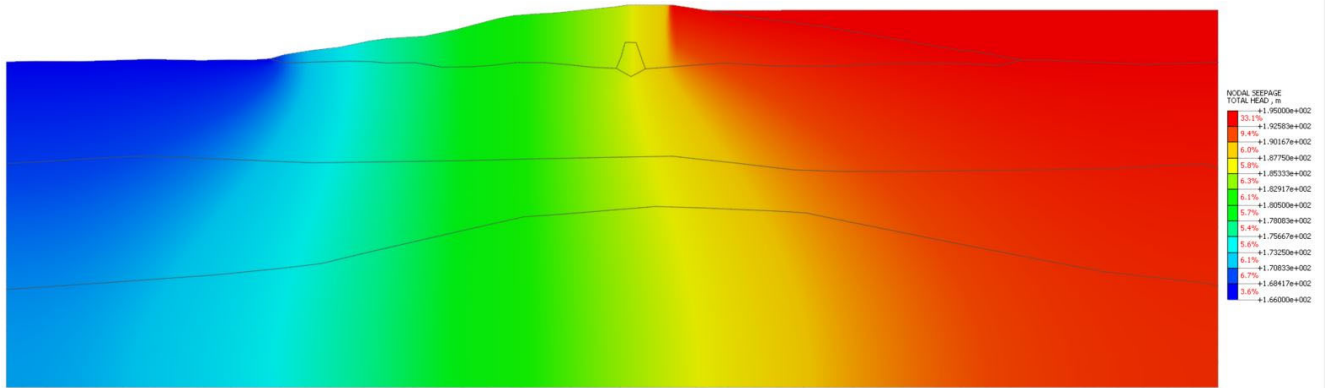


Рисунок 3.10 – Общий напор

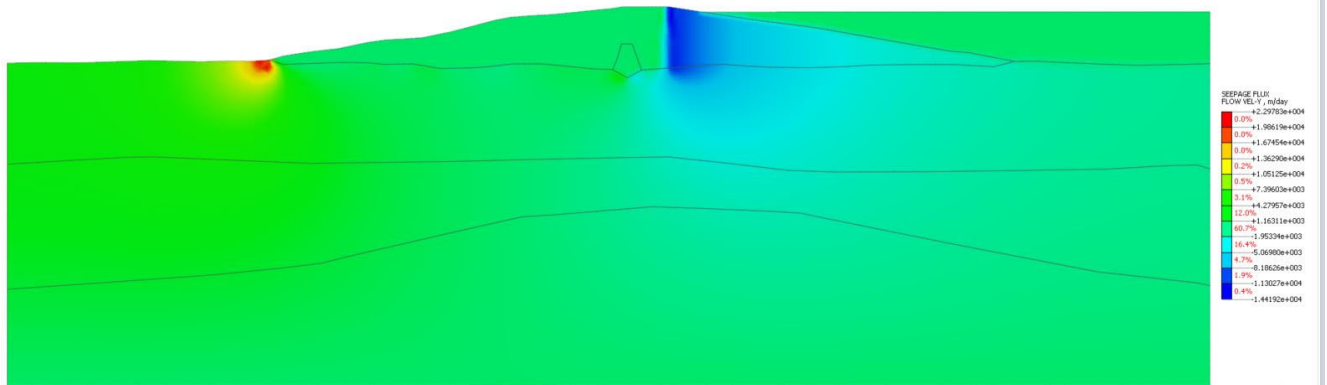


Рисунок 3.11 – Скорость фильтрационного потока

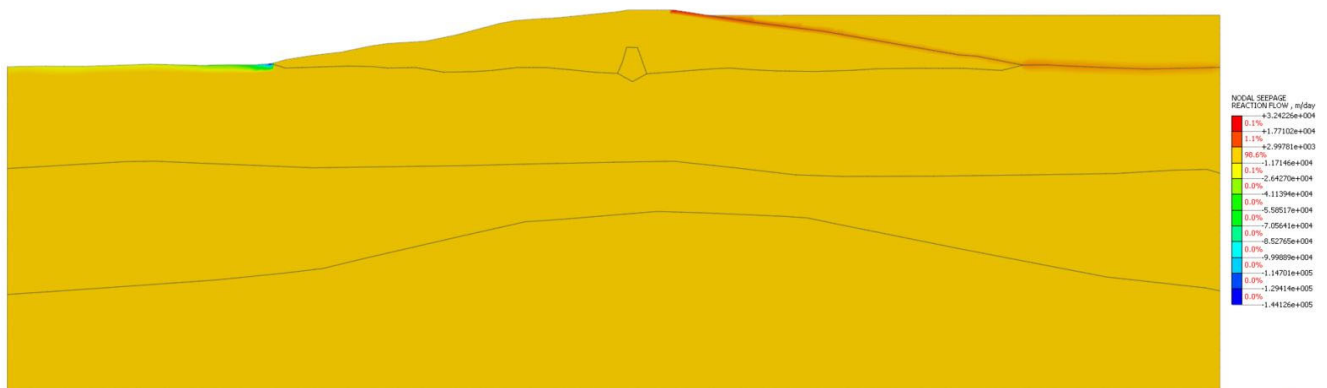


Рисунок 3.12 – Положение точки высачивания

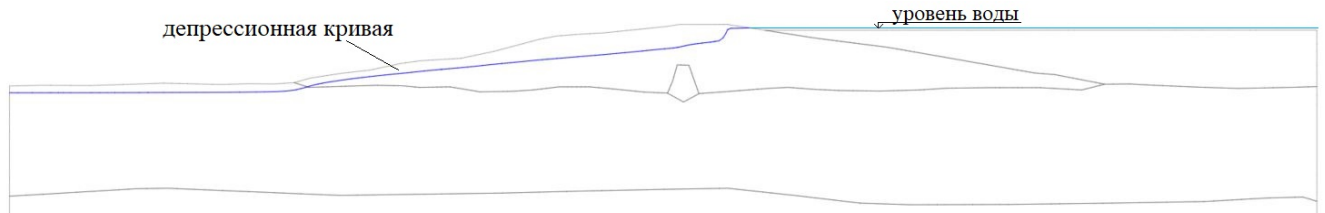


Рисунок 3.13 – Депрессионная кривая

На третьем этапе моделируется напряженно-деформированное состояние объекта, с учетом порового давления, веса самого объекта и граничных условий. Результаты расчета эффективных общих напряжений, полученные на данном этапе, показаны в приложении Г.

Расчеты вертикальных и горизонтальных сдвиговых напряжений показали, что они достаточно однородные и не приводят к появлению цилиндрических или эллиптических поверхностей скольжения, которые могут вызвать оползни в теле ограждающей дамбы.

Расчеты, полученные методами SRM и SAM, оказались очень близкими по величине расчетных параметров, при этом ни один из этих методов не показал наличия сдвиговых напряжений и поверхностей скольжения. Хотя коэффициенты устойчивости, определенные методом SRM, $K_{SRM} = 1,05$ и методом SAM $K_{SAM} = 1,54$ значительно различаются, и K_{SRM} равно предельному для этой категории сооружений [37]. Однако для использования всегда выбирается наименьший расчетный коэффициент устойчивости. Следует отметить, что снижение коэффициента устойчивости связано не с напряженно-деформированным состоянием объекта, а с фильтрационными процессами.

Трехмерная задача. В трехмерной постановке можно решить не все из вышеперечисленных задач. В программном комплексе GTS NX в трехмерной постановке есть средства для моделирования порового давления, общих напряжений и фильтрационных потоков. Для этого создается трехмерная модель дамбы (рисунок 3.14, а), задаются свойства материалов дамбы и слоев основания и выполняются расчеты фильтрации (рисунок 3.14, б–д).

На рисунках 3.9 и 3.14, б показаны одинаковые закономерности и обратные цветовые легенды.

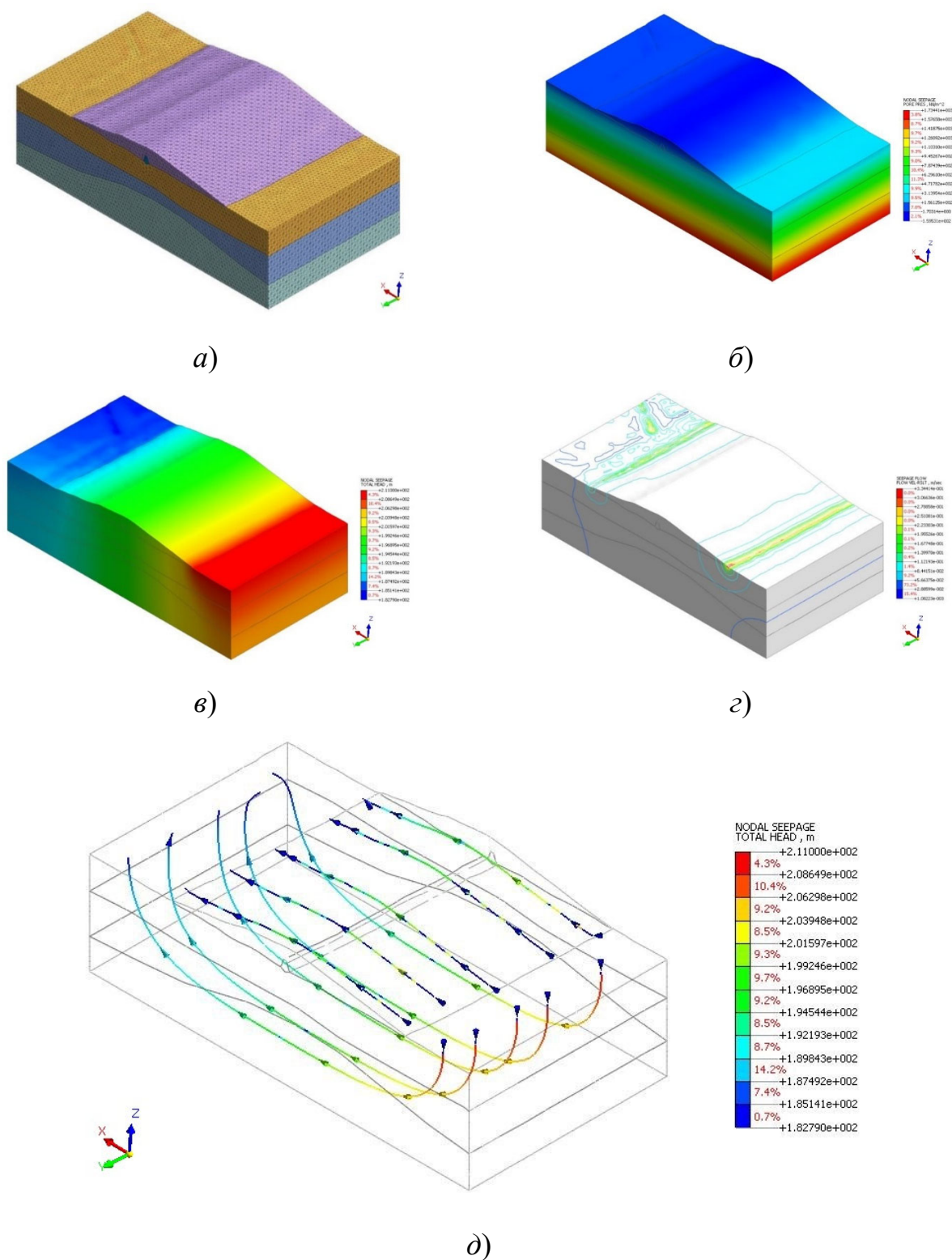


Рисунок 3.14 – Трехмерная модель дамбы и результаты расчета: а) трехмерная модель дамбы; б) скорость потока (в изолиниях); в) общие напряжения; г) скорость потока (в изолиниях); д) фильтрационные потоки

Детально результаты расчета приведены в приложениях А, Б.

Расчет в Rocscience Slide 6.0. [40]. В расчетной схеме устойчивости откоса ограждающей дамбы поверхность скольжения представляет собой комбинацию прямолинейных и криволинейных участков. Форма поверхности скольжения в ненагруженных однородных откосах определяется, в конечном счете, направлением действия главных напряжений и величиной угла внутреннего трения ρ .

Поверхность скольжения начинается с глубины h , ниже она располагается под углом $\mu = (45^\circ - \rho/2)$ к наибольшему главному напряжению и носит криволинейный характер. Длина прямолинейного участка является линией контакта дамбы с основанием и зависит от угла его наклона.

Ширина призмы возможного обрушения определяется формулой:

$$B = \frac{2 \left[H(1 - ctg\alpha \times tg\frac{\alpha + \rho}{2}) - h \right]}{ctg\mu + tg\frac{\alpha + \rho}{2}}, \quad (3.4)$$

где H – высота сооружения, м;

α – угол наклона откоса дамбы, градус;

h – начало поверхности скольжения (глубина), м.

В числе рекомендуемых способов расчета устойчивости откосов грунтовых дамб и плотин гидротехнических сооружений названы способы Крея Г., Терцаги К. и Чугаева Р. Р. (весового давления, а также наклонных и горизонтальных сил), оперирующие с расчлененной на вертикальные элементы призмой обрушения и с произвольной или круглоцилиндрической поверхностью скольжения, удовлетворяющие условиям равновесия в предельном состоянии. В качестве методов расчета могут быть использованы методы, основанные на гипотезе наклонных и горизонтальных сил взаимодействия между элементами призмы обрушения, способ весового давления и другие.

Согласно [45] расчеты устойчивости откосов грунтовых плотин (дамб) всех классов следует выполнять для круглоцилиндрических поверхностей скольжения. В рамках проекта расчет произведен для круглоцилиндрических поверхностей

скольжения, который достаточно точен и дает возможность получать результаты, использующие все три условия статики тела. Расчеты выполнены в программном комплексе Rocscience Slide 6.0, который позволяет выполнять расчеты, согласно вышеприведенной методике.

Rocscience Slide – это универсальная программа для 2D-анализа напряжений методом конечных элементов, которая может использоваться для проектирования подземных горных выработок, карьеров и поддерживающих их систем, а также насыпных типов гидротехнических сооружений. Она может применяться как для скальных, так и для дисперсных грунтов, обеспечивает выполнение анализа устойчивости склонов и откосов, динамического анализа, а также включает в себя интегрированную модель фильтрации подземных вод [36].

Rocscience Slide является программой для расчета устойчивости грунтовых сооружений методами предельного равновесия со встроенным конечно-элементным анализом фильтрации в установившемся и неустойчивом режиме. Программа имеет широкие возможности вероятностного анализа, при этом можно назначить статистическое распределение почти любого входного параметра, в том числе свойств материалов, свойств армирующих элементов, нагрузок и уровня грунтовых вод. Rocscience Slide 6.0 предлагает не менее 17 различных моделей поведения грунта, в том числе Мора-Кулона, анизотропного грунта, Хека-Брауна и т. д.

Выбор участков для проведения расчетов на статическую и фильтрационную устойчивость проводился на основании имеющейся сканерной съемки фактического состояния золоотвала, данных устойчивости гидротехнического сооружения.

Расчеты устойчивости выполнялись с учетом неоднородности геологического строения и инженерно-геологических условий дамбы золоотвала ТОО «Главная распределительная энергостанция Топар». Прочностные параметры по выделенным инженерно-геологическим элементам задаются в виде значений сцепления c и угла внутреннего трения φ (рисунок 3.15).

Район расположения дамбы относится к сейсмобезопасным, следовательно, при расчетах устойчивости сейсмические воздействия в виде дополнительных активных сдвигающих сил не учитывались.

Полностью конечно-элементное моделирование установившегося режима грунтовых (подземных) вод и программа интерпретации встроены непосредственно в программу.

В расчетах были приняты физико-механические характеристики грунтов насыпи и основания, полученные по результатам инженерно-геологических изысканий и результатов георадарной съемки.

Проведенный расчет коэффициента запаса устойчивости показал результат, равный 1,708 (рисунок 3.16), что значительно выше расчетно-нормативного, который равен значению 1,26 для II класса сооружения.

Таким образом, в наихудших условиях при максимальной влажности пород и минимальных значениях прочностных характеристик, состояние откосов дамб близко к предельному. В связи с предельным состоянием откосов дамб необходимо следить за положением кривой депрессии в теле дамбы и проводить мероприятия, направленные на повышение их устойчивости: дренаж, пригрузку откосов контрфорсами из скальных или полускальных пород.

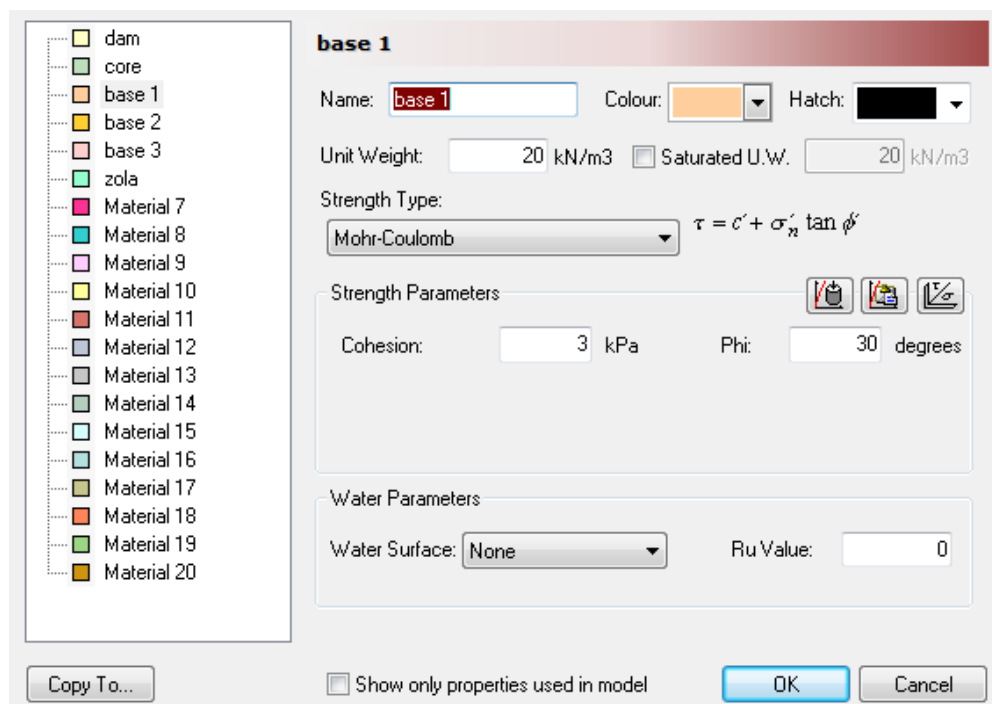


Рисунок 3.15 – Окно ввода физико-механических параметров грунтов основания и тела дамбы

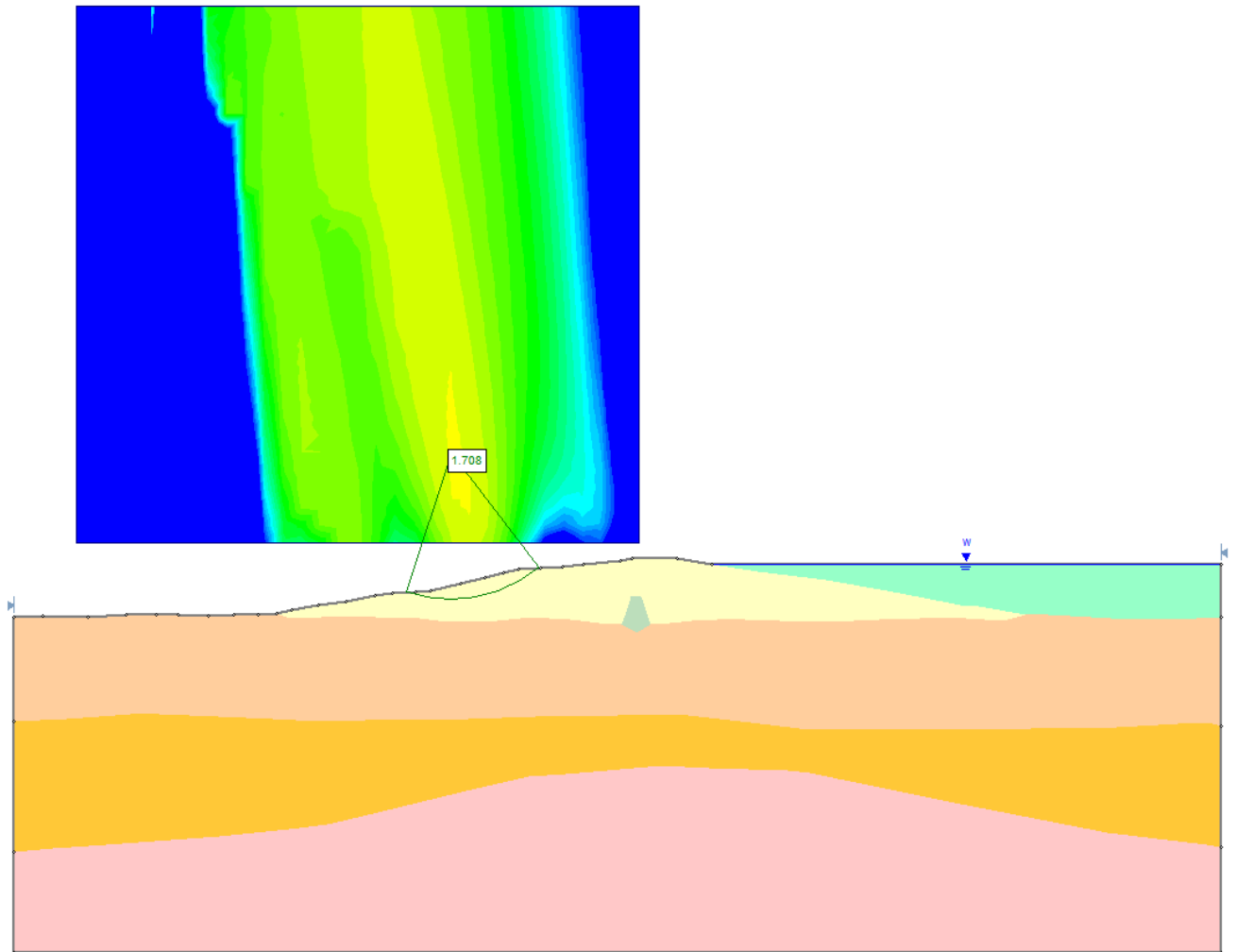


Рисунок 3.16 – Расчет устойчивости дамбы золоотвала в ПК Rocscience Slide

Исследование устойчивости ограждающей дамбы золоотвала ТОО «Главная распределительная энергостанция Топар» показало, что расчеты устойчивости, выполненные методом конечных элементов, могут значительно отличаться. Так, при расчете методом понижения прочности (SRM) коэффициент запаса устойчивости $K_{SRM} = 1,05$, расчет методом анализа напряжений (SAM) $K_{SAM} = 1,54$ в программе GTS NX [52], а в программе Slide [36] $K_y = 1,71$, причем программа выдала круглоцилиндрическую поверхность скольжения. Традиционно при расчете коэффициента устойчивости разными методами выбирается для использования наименьший. Но самым главным элементом расчетов в программе является объяснение результатов. Так, в программе GTS NX при расчетах конечно-элементной модели мето-

дом понижения прочности показано, что при такой геометрии дамбы и свойств слагающих её материалов и пород основания не возникает сдвиговых напряжений и поверхности скольжения, а низкий коэффициент запаса устойчивости объясняется поровым давлением и фильтрационными процессами. Поэтому геотехнический мониторинг рекомендуется проводить в периоды максимального поступления жидкости в золоотвал и особое внимание обращать на водоприток в дренажную систему.

3.4 Этапы методики геодезического мониторинга

Методика наблюдений предполагает мониторинг как новых, так и существующих дамб (рисунок 3.17). Если дамба существующая, мониторинг начинается с оценки ее состояния [8]. Оценка состояния состоит из нескольких элементов:

- исследуется документация о строении дамбы и ее конструктивных особенностях строения, физико-механические свойства пород, которые слагают тело дамбы;
- выполняются геотомографические исследования для определения внутренней структуры тела дамбы с целью выявления неоднородностей, пустот и неоднородно увлажненного материала;
- проведение визуального контроля и непосредственного обследования;
- выполнение аэрофотосъемки БАС с целью фотографического контроля и трехмерного моделирования тела дамбы.

На основании этих данных создается трехмерная модель дамбы и вмещающих слоев пород с заданием физико-механических свойств. По этой трехмерной модели выполняется расчет устойчивости методом конечных элементов. Данные расчеты поступают в блок анализа, который анализирует расчет метода конечных элементов и коэффициента запаса устойчивости, в которой учитывается фильтрационная составляющая и гравитационная от веса пород тела дамбы и обводненной золы.

На основании этой информации выбираются методы и средства выполнения мониторинга и его периодичность [24].

В предлагаемой методике основным методом мониторинга является наземное лазерное сканирование. В некоторых случаях возможно применение геодезических методов измерений – тригонометрического и геометрического нивелирования.

Лазерное сканирование применяется в местах, наиболее подверженных деформациям путем сканирования участков дамбы с пунктов наблюдательных станций. Обработка сканов производится по алгоритму молдинга с выделением поверхности дамбы и фильтрации растительности [59].

После выполнения очередной эпохи сканирования анализируются полученные поверхности и оценивается разность этих поверхностей. Если отклонения поверхностей в допуске, продолжается безопасная эксплуатация объекта. Если отклонения больше допуска, то необходимо принятие мер. В качестве мер может быть сокращение периода наблюдений. Если отклонения требуют горно-технических мер (пригрузка оползневых участков или изменение профиля дамбы), то после выполнения этих мер переходим на этап моделирования и дальнейших расчетов коэффициента запаса устойчивости методом конечных элементов.

Далее следует выполнение пунктов методики, т. е. анализ расчета метода конечных элементов и получение нового коэффициента запаса устойчивости. На основании этой информации выбираются методы и средства выполнения мониторинга и его периодичность. Следующим этапом является наземное лазерное сканирование и анализ поверхности, который должен показать, что возможна безопасная эксплуатация дамбы [71].

Для автоматизации этих процессов была составлена программа *Dam deformation*, которая позволяет хранить информацию о дамбе и ее измерениях в базе данных.

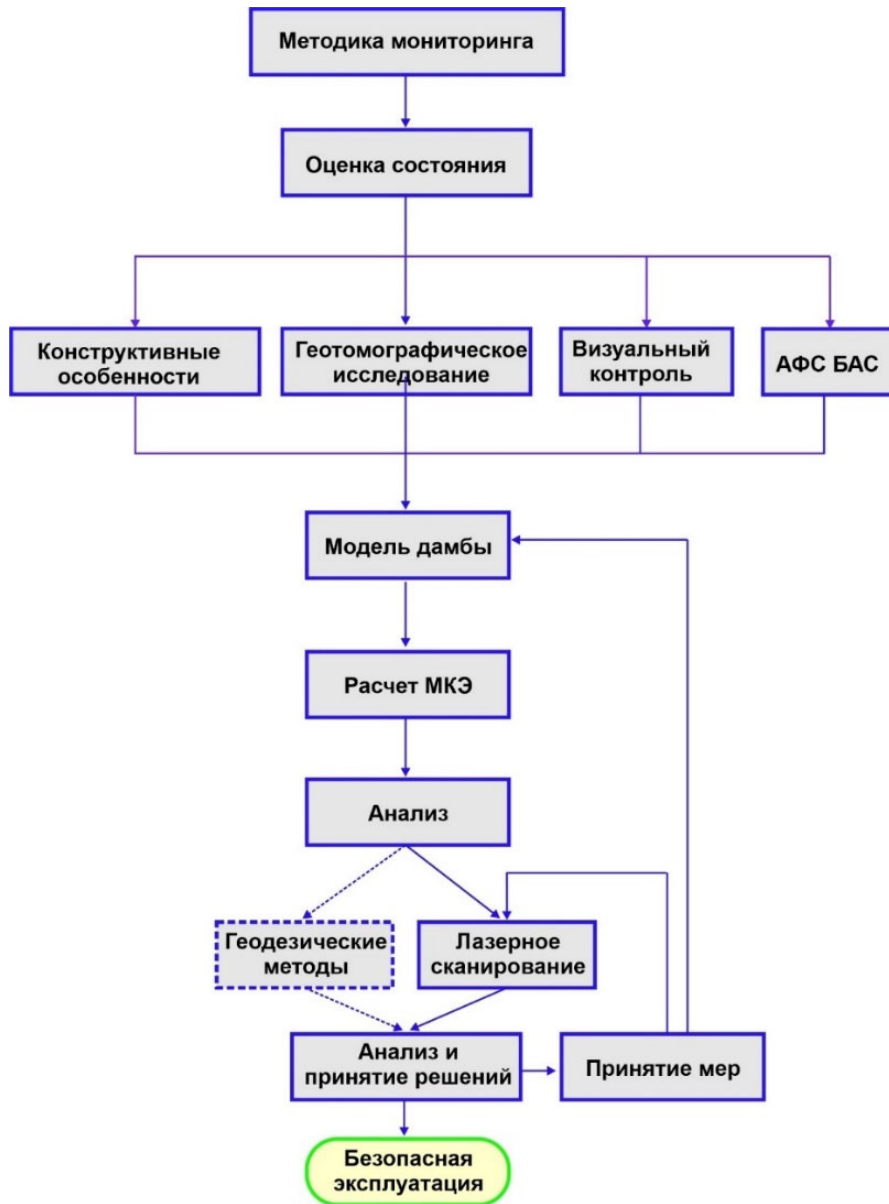


Рисунок 3.17 – Схема этапов методики геодезического мониторинга

3.5 Структура базы данных программного комплекса Dam deformation

Программный комплекс Dam deformation является справочно-информационной системой для организации данных геотехнического мониторинга за деформациями насыпных дамб золоотвалов. Целями программного комплекса Dam deformation является организация базы данных (БД) для хранения комплексной информации о всех видах обследования и мониторинга дамбы и удобства выборки нужных данных для использования при составлении заключения о устойчивости со-

оружения. Второй важной задачей является подготовка информации для составления конечно-элементной модели и экспорта этой модели для расчетов [44].

На рисунке 3.18 приведена несколько упрощенная схема базы данных программного комплекса Dam deformation. На схеме показаны только главные таблицы базы данных, без классификаторов и связей много ко многим. Реализация БД осуществляется с помощью реляционной системы управления базами данных SQLite.

Главной таблицей БД является таблица «Дата контроля», которая связывает дату, объект и исполнителя. Таблица «Объект» хранит информацию об объекте, его конструктивных особенностях, проектную документацию и другие параметры объекта, необходимые для организации мониторинга и расчетов. Соглашения об типах данных полей БД следующие – идентификаторы ID и N_ – это целочисленные поля, все остальные поля это строки (длиной до 2Гб) или большие двоичные объекты (BLOB).

Таблица «Дата контроля» связана с таблицами съемок или обследований. Хотя в программном комплексе Dam deformation основным видом съемки является наземное лазерное сканирование, предусмотрена возможность хранения традиционных геодезических наблюдений по профильным линиям с помощью геометрического и/или тригонометрического нивелирования. Для этого служит таблица «Геодезические съемки», связанная с таблицей «Данные съемки» отношением «один-ко-многим». В таблице «Данные съемки» хранятся координаты точек по профильным линиям на разные даты, которые можно представить в виде графиков.

Таблица «Визуальное обследование» содержит материалы визуального обследования дамбы золоотвала. Эти обследования с фотофиксацией должны выполнять ответственные работники эксплуатирующей организации. Эти материалы хранятся в БД на дату обследования и являются подтверждением выполненного обследования. Визуальное обследование может выполняться по материалам аэросъемки, для этого используется таблица «Фото АФС».

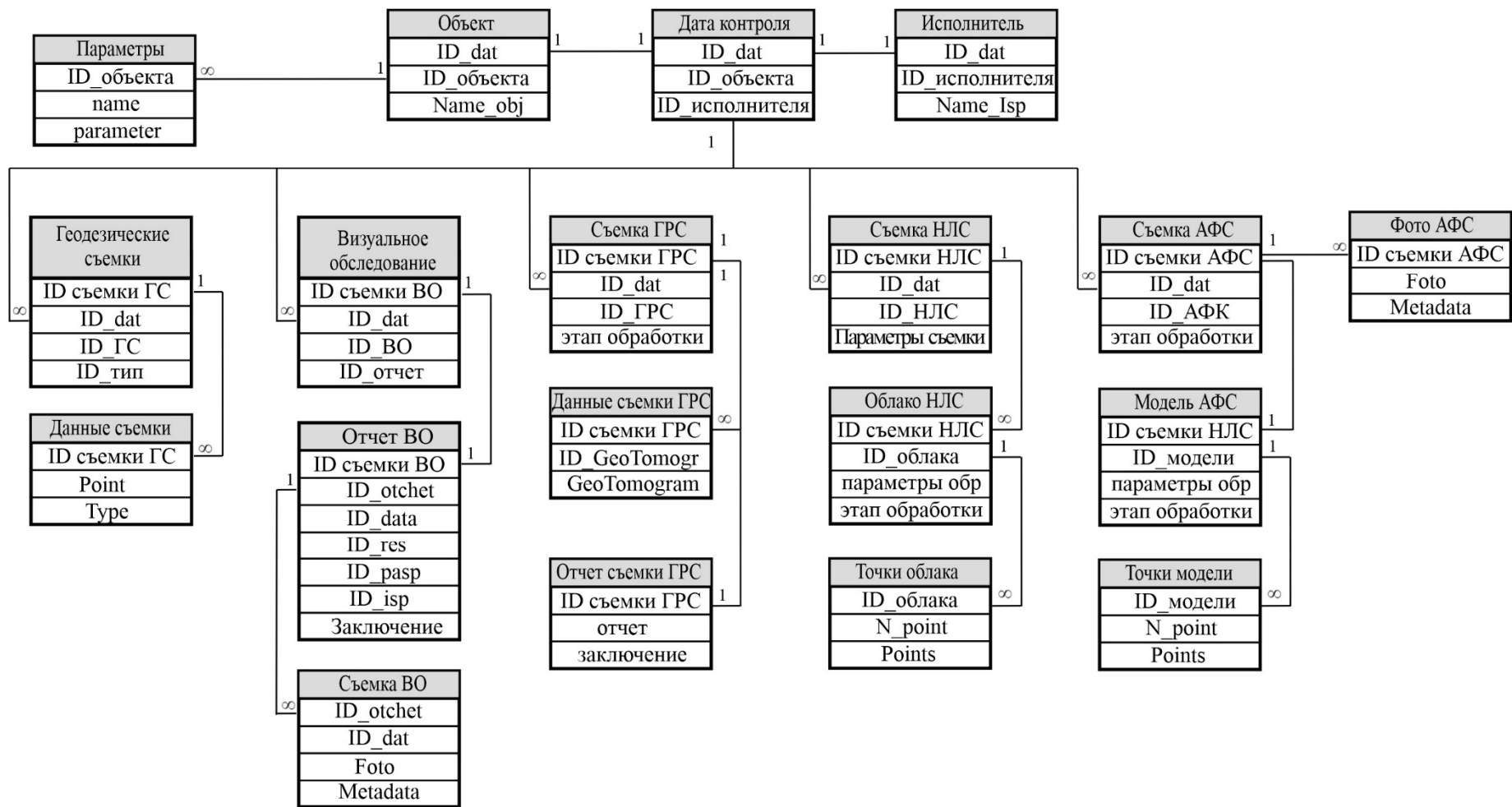


Рисунок 3.18 – Структура базы данных ПК Dam deformation

По материалам визуального обследования составляется заключение о возможности безопасной эксплуатации или совершении некоторых действий, например, внепланового лазерного сканирования или необходимости расчистки дренажной канавы и т. д.

Для дамб, которые только вводятся в эксплуатацию, и дамб, которые имеют длительный срок эксплуатации бывает необходимо выполнить георадарную съемку, чтобы убедиться в однородности строения дамбы и отсутствии структурных аномалий. Такие данные хранятся в таблицах «Съемка ГРС» и сами геотомограммы хранятся в таблице «Данные съемки ГРС». По этим данным составляется заключение о структурном строении дамбы, которое записывается в таблицу «Отчет съемки ГРС».

Таблица «Съемка НЛС» является основной для хранения информации наземного лазерного сканирования. Эта таблица связана с таблицей «Облако НЛС», которая предназначена как для хранения исходных данных облаков НЛС, так и этапов их обработки, которых может быть несколько для различных вариантов фильтрации. Собственно, точки облаков хранятся в таблице «Точки облака» – эти точки являются поверхностью дамбы, очищенной от растительности, и их можно сравнивать между собой на разные даты. Так можно выявить участки, которые подверглись деформациям за определенный период.

Еще одним источником информации о состоянии дамбы является аэрофотосъемка БАС. По точности определения координат поверхности аэрофотосъемка беспилотными авиационными системами пока уступает лазерному сканированию, но по объему информации и возможности автоматизированной обработки эти технологии существенно сблизились. Модель, полученная по материалам аэрофотосъемки БАС, используется для визуального обследования по фотографиям дамбы, но основное её назначение – это трехмерное моделирование тела дамбы, которое в совокупности с данными о строении и материале дамбы из таблицы «Параметры» используется для конечно-элементного моделирования и расчетов коэффициента запаса устойчивости. А уже по текущему значению коэффициента запаса устойчи-

ности принимаются решения по частоте наблюдений при выполнении мониторинга или изменении геотехнических параметров дамбы.

3.6 Выводы по третьему разделу

В данном разделе представлена методика геодезического мониторинга за дамбой № 1 золоотвала ТОО «Главная распределительная энергостанция Топар». В рамках этой методики была применена технология для визуального мониторинга за объектом исследования с помощью БАС. Аэрофотосъемка также используется для построения детальной трехмерной модели тела дамбы. Полученная модель позволяет перейти к конечно-элементной модели и произвести расчет устойчивости и фильтрационных процессов в теле дамбы.

Основным преимуществом данной методики является большой объем и высокая скорость проведения сбора пространственных данных.

В последующем, трехмерная модель тела дамбы применяется для расчета устойчивости и фильтрации в программном комплексе Midas GTS NX.

Этот комплекс имеет множество методов расчета, и самое главное – позволяет объяснить результаты расчета.

Еще одним достоинством является то, что при расчете устойчивости можно задать и учитывать множество параметров физико-механических свойств грунтов. Это позволяет наиболее точно рассчитать коэффициент запаса устойчивости сооружения и определить фильтрационные потоки.

Структура базы данных, предложенная в разделе, позволяет эффективно хранить первичные данные облаков точек лазерных отражений, оперировать этими данными и хранить производные от этих данных – топологически эквивалентные сетки. А это, в свою очередь, позволяет хранить комплексную информации о всех видах обследования и мониторинга дамбы и удобства выборки нужных данных для использования при составлении заключения о устойчивости сооружения, а также подготовить информацию для составления конечно-элементной модели и экспорте этой модели для расчетов.

В результате моделирования и исследования процессов фильтрации установлено, что наибольший вклад в снижение коэффициента запаса устойчивости дамбы вносят именно фильтрационные процессы – поэтому геодезический мониторинг целесообразно проводить в периоды максимального водопритока – весной после таяния снега и накопившегося в зимнее время льда и периодически после сильных и продолжительных дождей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований поставленная цель достигнута, а именно – разработана методика геодезического мониторинга состояния ограждающих гидротехнических сооружений с применением технологии наземного лазерного сканирования на примере золоотвала ТОО «Главная распределительная энергостанция Топар».

Основные научные и практические результаты диссертационного исследования заключаются в следующем:

– выполнен анализ существующих методов геодезического мониторинга ограждающих гидротехнических сооружений и нормативной документации, что позволило определить достоинства и недостатки существующих методов геодезического мониторинга состояния гидротехнических сооружений и сформулировать цель и задачи диссертационного исследования;

– выполнено экспериментальное апробирование применения технологии лазерного сканирования дамбы золоотвала с подбором параметров фильтрации для эффективного удаления растительности из ТЛЮ и анализом «щебенчатых» поверхностей, в результате которого доказана высокая точность определения деформаций данного класса гидротехнических инженерных сооружений как точечным, так и площадным методами;

– исследование результатов трехмерного моделирования тела дамбы методом конечных элементов с вычислением коэффициент запаса устойчивости, зависящего от процесса фильтрации и в основном влияющего на деформационное состояние гидротехнического сооружения, позволило предложить определение периодичности выполнения геодезического мониторинга;

– разработана структура базы данных для хранения комплексной информации о геодезических измерениях, результатах 3D-моделирования тела дамбы и параметрах ее деформационного состояния, которая позволяет сделать заключение об устойчивости инженерного сооружения и условиях его безопасной эксплуатации;

– выполнена апробация разработанной методики на примере геодезического мониторинга насыпных дамб золоотвала ТОО «Главная распределительная энерго-

станция Топар», которая подтвердила возможность применения разработанной методики для контроля состояния устойчивости насыпных дамб с требуемой для этого нормативной точностью.

Результаты исследования рекомендуются к использованию при выполнении геодезического мониторинга для оценки технического состояния насыпных гидротехнических сооружений и продолжения их безопасной эксплуатации. Предлагается дополнить нормативную документацию расчетными методами определения допустимых деформаций.

Перспективы дальнейших исследований по данной тематике заключаются в выявлении общих закономерностей фильтрации пространственных данных наземного лазерного сканирования и аэрофотосъемки для повышения точности создания трехмерных моделей дамб и плотин для более точного расчета устойчивости сооружения и фильтрационных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Автоматизация методов расчета устойчивости карьерных откосов / П. С. Шпаков, К. К. Темирханов, С. Г. Ожигин, С. Б. Ожигина. – Текст : непосредственный // Маркшейдерия и недропользование. – 2006. – № 1. – С. 47–49.

2 Азаров, Б. Ф. Наземное лазерное сканирование как инструмент для формирования информационных моделей зданий и сооружений / Б. Ф. Азаров, И. В. Карелина. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80. – № 6. – С. 16–23.

3 Алексеенко, Н. Н. Применение технологии лазерного сканирования в различных отраслях и на различных этапах жизненного цикла объектов / Н. Н. Алексеенко. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2016. – № 2. – С. 62–73.

4 Алтынцев, М. А. Информационные технологии. Создание топографических планов в ПК Microstation. В 2 ч. Ч. 2 : лабораторный практикум / М. А. Алтынцев. – Новосибирск: СГУГиТ, 2016. – 86 с. – Текст : непосредственный.

5 Анализ принципов работы наземных лазерных сканеров / Р. А. Дьяченко, Н. И. Хушт, Г. Т. Акопян, Д. А. Гура, А. П. Недякина. – Текст : непосредственный // Научные чтения имени профессора Н. Е. Жуковского : сборник научных статей XI Международной научно-практической конференции. – Краснодар : ООО «Издательский Дом – Юг», 2021. – С. 479–485.

6 Аникушкин, М. Н. Наземные системы лазерного сканирования. Опыт работ / М. Н. Аникушкин. – Текст : непосредственный // Геопрофи. – 2005. – № 1. – С. 49–50.

7 Бесимбаева, О. Г. Современные методы мониторинга гидротехнических сооружений : монография / О. Г. Бесимбаева. – Караганда : Изд-во КарГУ, 2016. – 226 с. – Текст : непосредственный.

8 Бесимбаева, О. Г. Создание системы геомониторинга для условий золоотвала ГРЭС / О. Г. Бесимбаева, Н. Ф. Низаметдинов. – Текст : непосредственный // Труды Университета. – КарГТУ, 2007. – № 4. – С. 12–15.

9 Брынь, М. Я. Опыт наземного лазерного сканирования крупного промышленного объекта для формирования цифровой информационной модели / М. Я. Брынь, М. Н. Аникушкин, А. А. Шарафутдинова. – Текст : непосредственный // Совершенствование средств и методов сбора и обработки геопространственной информации и системы подготовки специалистов: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 15 мая 2020 года. – Санкт-Петербург : Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, 2021. – С. 291–298.

10 Геомониторинг состояния устойчивости карьерных откосов / Ф. К Низаметдинов, М. Г. Мустафин, С. Г. Ожигин, А. С. Туякбай // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. науч. конгр., 18 июня – 8 июля 2020 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 1 : Национальная науч. конф. с междунар. участием «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. № 1. – 2020. – С. 176–185.

11 Гольдин, А. Л. Проектирование грунтовых плотин / А. Л. Гольдин, Л. Н. Рассказов. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 384 с. – Текст : непосредственный.

12 ГОСТ 24846–2019. Грунты Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200174422>. – Текст : электронный.

13 ГОСТ 25100–2011. Грунты. Классификация. – URL: <https://sground.ru/wp-content/uploads/2018/05/GOST-25100-2011.pdf>. – Текст : электронный.

14 ГОСТ Р 70117–2022. Шероховатость поверхности. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/78008/>. – Текст : электронный.

15 Инструкция по наблюдению за деформациями бортов, откосов, уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости : утверждена постановлением Госгортехнадзора СССР от 21.07.1970. – Ленинград : ВНИМИ, 1971. – 188 с. – Текст : непосредственный.

16 Карлсон, А. А. Руководство по натурным наблюдениям за деформациями гидротехнических сооружений и их оснований геодезическими методами / А. А. Карлсон. – Москва : Энергия, 1980. – 201 с. – Текст : непосредственный.

17 Классификация точек лазерного отражения и методика их распознавания / Н. М. Кирюникова, Э. Д. Лесовая, Н. И. Хушт, Г. Т. Акопян, Д. А. Гура. – Текст : непосредственный // Молодежная наука : сборник лучших научных работ молодых ученых по результатам XLVII студенческой научной конференции. – Краснодар : Кубанский государственный технологический университет, 2021. – С. 128–132.

18 Комиссаров, А. В. Лазерное сканирование: обобщение существующей практики / А. В. Комиссаров. – Текст : непосредственный // Инженерные изыскания. – 2013. – № 2. – С. 22–25.

19 Критерии безопасности гидротехнических сооружений как основа контроля их состояния / А. И. Царев, И. Н. Иващенко, В. В. Малаханов, И. Ф. Блинов. – Текст : непосредственный // Гидротехническое строительство. – 1994. – № 1. – С. 9–14.

20 Крутиков, Д. В. Опыт применения технологии наземного лазерного сканирования в решении инженерных и геодезических задач / Д. В. Крутиков. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2015. – № S15-2. – С. 29–31.

21 Кузнецов, В. С. Критерии оценки надежности и безопасности грунтовых плотин / В. С. Кузнецов. – Текст : непосредственный // Известия ВНИИГ. – 2000. – Т. 238. – Москва : Стройиздат, 1983.

22 Маций, С. И. Геотехнический мониторинг : методические указания по дисциплине и для самостоятельной работы / С. И. Маций, А. К. Рябухин. – Краснодар : КубГАУ, 2019. – 51 с. – Текст : непосредственный.

23 Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости : согласованы приказом Комитета по государственному контролю за чрезвычайными ситуациями и промышленной безопасностью Республики Казахстан от 22.09.2008 № 39. – Текст : непосредственный.

24 Мустафин, М. Г. Некоторые особенности мониторинга деформационных процессов на горно-гидротехнических объектах / М. Г. Мустафин, Х. Д. Аль Фатин, Х. М. Хатум. – Текст : непосредственный // Маркшейдерский вестник. – 2020. – № 6. – С. 51–60.

25 Мустафин, М. Г. Оценка вертикальных смещений оснований зданий и сооружений на основе анализа элементов деформационной сети / М. Г. Мустафин, Х. В. Нгуен. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2019. – № 3. – С. 11–19.

26 Наземное лазерное сканирование : монография / В. А. Середович, А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова ; Сибирская государственная геодезическая академия. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 261 с. – ISBN 978-5-87693-336-2. – Текст : непосредственный.

27 Нарращивание дамб золоотвала Карагандинской ГРЭС-2 (III очередь). Мат. изысканий. Геология и гидрогеология : технический отчет. – Теплоэлектропроект, Ростовское отделение, арх. 259, 1990. – Текст : непосредственный.

28 Неволин, А. Г. 3D-моделирование крупногабаритных промышленных агрегатов с помощью программного комплекса Cyclone / А. Г. Неволин, Т. М. Медведская. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск : сб. материалов в 9 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. № 1. – С. 223–230.

29 Низаметдинов, Ф. К. Перспективы использования наземной радарной интерферометрии в Республике Казахстан / Ф. К. Низаметдинов, Д. В. Мозер, А. К. Омарова. – Текст : непосредственный // Мат. VII Междунар. науч.-прак. конф.: «Наука и новейшие технологии при поисках, разведке и разработке месторождений полезных ископаемых». – Москва, 2012. – 102 с.

30 Низаметдинов, Ф. К. Устойчивость насыпных гидротехнических сооружений / Ф. К. Низаметдинов, О. Г. Бесимбаева, В. Н. Долгоносков. – Караганда: КарГТУ, 2013. – 178 с.

31 Об утверждении критериев классификации гидротехнических сооружений : постановление Правительства РФ от 05.10.2020 № 1607. – URL: <https://base.garant.ru/74732297/>. – Текст : электронный.

32 Обследование плотины Щерубай-Нурина водохранилища : отчет о научно-исследовательской работе. – Караганда : 2018. – 89 с. – Текст : непосредственный.

33 Опыт применения наземного лазерного сканирования при обследовании инженерных сооружений / Д. А. Афонин, Н. Н. Богомолова, М. Я. Брынь, А. А. Никитчин. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2020. – Т. 81. – № 4. – С. 2–8.

34 П 13–83. Проектирование оснований гидротехнических сооружений (Пособие к СНиП II-16–76). – Ленинград : ВНИИГ, 1984.

35 П 26–5. Рекомендация по проектированию золошлакоотвалов тепловых электростанций. – Ленинград : ВНИИГ, 1986.

36 Программная система конечно-элементного анализа Rocscience. – URL: <https://www.rocscience.com/software/slide2>. – Текст : электронный.

37 Разработка и создание комплекса мероприятий по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений : методическое пособие. – URL: https://unesce.org/fileadmin/DAM/env/water/damsafety/textbook_annexes.pdf. – Текст : электронный.

38 РД 34.27.509–91. Типовая инструкция по эксплуатации золошлакоотвалов тепловых электростанций. – Москва : СПО ОРГРЭС, 1992. – 40 с. – Текст : непосредственный.

39 Руководства Leica Cyclone. – URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.f0ecb3f4-64eb2e60-108d163d-74722d776562/https/www.manualslib.com/products/leica-cyclone-8753135.html. – Текст : электронный.

40 Руководство по геотехнической программе Slide 6.0. – URL: <https://www.twirpx.com/file/1633137/>. – Текст : электронный.

41 Руководство пользователя RadExplorer 1.4. – URL: https://www.guidelinegeoc.cdn.triggerfish.cloud/uploads/2016/07/RadExplorer14_user_manual_ENG.pdf. – Текст : электронный.

42 Рымқұлова, А. Б. Бұрыштық рефракцияның геокеңістіктік деректердің өлшенген мәндеріне әсерін есепке алу / А. Б. Рымқұлова, Р. Р. Ханнанов. – Текст : непосредственный // Труды университета. – Караганда : КарТУ им. А. Сагинова, 2022. – № 4. – С. 138–142.

43 Саидходжаева, Д. Основные причины и последствия прорыва плотин при гидродинамических авариях / Д. Саидходжаева, А. Абдувосиев, И. Хамидов. – Текст : непосредственный // Oriental Renaissance: Innovative, Educational, Natural and Social Sciences. – 2021. – Вып. 4, № 1. – С. 697–707.

44 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680204 Российская Федерация. Dam deformations : № 2021669927 : дата поступления 08.12.2021 : дата регистрации 08.12.2021 / Шоломицкий А. А., Ханнанов Р. Р. ; правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (RU). – Текст: непосредственный.

45 СН РК 1.04-04–2002. Обследование и оценка технического состояния зданий и сооружений. – URL: http://kazib.kz/downloads/regulations/Obsledovnie_i_ocenka_tech_sostoyaniya_zdaniy_i_sooruzheniy_CH_RoK_1.04-04-2002.pdf. – Текст : электронный.

46 СН РК 3.04-01–2018. Гидротехнические сооружения. – URL: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=34423925. – Текст : электронный

47 СНиП 2.06.05–84. Плотины из грунтовых материалов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/871001208>. – Текст : электронный.

48 СНиП II-58–75. Тепловые электростанции. – URL: <https://ohrana-truda.ru/upload/iblock/1a6/4294854777.pdf>. – Текст : электронный.

49 СНиП РК 3.04-01–2008. Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования. – URL: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30505076. – Текст : электронный.

50 СНиП РК 3.04-02–2008. Плотины из грунтовых материалов. – URL: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30401586. – Текст : электронный.

51 СП 58.13330.2019. Гидротехнические сооружения. Основные положения. – URL: [http:// polus-user-doc.readthedocs.io/downloads58.13330](http://polus-user-doc.readthedocs.io/downloads58.13330). – Текст : электронный.

52 Специализированные расчетные комплексы MIDAS: midas GTS NX. – URL: <https://midasoft.ru/products/midas-gts-nx/#capabilities>. – Текст : электронный.

53 Технологическая схема определения геометрических параметров подкрановых конструкций инженерных сооружений на подрабатываемых территориях / Г. А. Уставич, Е. А. Олейникова, И. А. Мезенцев, А. С. Горилько , Е. В. Ситникова, Р. Р. Ханнанов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2023. – Т. 28, № 5. – С. 14–24.

54 Технология автоматизированного проектирования железных дорог с использованием цифровых и математических моделей местности / О. Г. Бесимбаева, Е. Н. Хмырова, Е. А. Олейникова, Р. Р. Ханнанов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 4. – С. 5–16.

55 Устинов, А. В. Технология геодезического мониторинга деформаций гидротехнических сооружений на основе использования глобальных навигационных систем / А. В. Устинов. – Текст : непосредственный // Науки о Земле. – 2015. – № 1 (13). – С. 133–136.

56 Устройство и принцип работы наземного лазерного сканера на примере Leica Scanstation C10. / Д. А. Гура, Р. А. Дьяченко, А. В. Андрющенко, И. А. Белоконь, В. Е. Степаненко. – Текст : непосредственный // Научные чтения имени профессора Н. Е. Жуковского : сборник научных статей XIII Международной научно-практической конференции. – Краснодар : Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А. К. Серова, 2023. – С. 357–361.

57 Ханнанов, Р. Р. Анализ результатов геодезических измерений на гидротехнических сооружениях / Р. Р. Ханнанов. – Текст : непосредственный // Актуальные научные исследования в современном мире. – Переяслав : 2020. – В. 4 (60), ч. 3. – С. 96–100.

58 Ханнанов, Р. Р. Геодезический мониторинг состояния ограждающей дамбы № 1 золоотвала ТОО «ГРЭС Топар» по методике наземного лазерного сканирова-

ния / Р. Р. Ханнанов, А. В. Михнев. – Текст: непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. науч. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. – С. 13–18.

59 Ханнанов, Р. Р. Гидротехникалық құрылыстар жағдайының мониторингі / Р. Р. Ханнанов, Ж Алданыш, А. В. Михнев. – Текст : непосредственный // Актуальные научные исследования в современном мире. – Переяслав : 2020. – В. 7 (63), ч. 4. – С. 76–83.

60 Ханнанов, Р. Р. Лазерное сканирование для определения деформаций насыпных дамб / Р. Р. Ханнанов. – Текст: непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIX Международный научный конгресс, 17–19 мая 2023 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2023. № 1. – С. 149–153.

61 Ханнанов, Р. Р. Определения деформаций насыпных дамб по результатам наземного лазерного сканирования / Р. Р. Ханнанов. – Текст : непосредственный // Естественные и технические науки. – Москва : Спутник, 2023. – № 7 (182) – С. 92–95.

62 Ханнанов, Р. Р. Применение методики наземного лазерного сканирования при геодезическом мониторинге состояния ограждающей дамбы насыпного типа / Р. Р. Ханнанов, А. В. Михнев. – Текст: непосредственный // Труды Международного маркшейдерского форума «Геопространственная цифровая инженерия в геодезии, маркшейдерии и геомеханике». – Караганда : ТОО САНАТ-Полиграфия, 2022. – С. 137–141.

63 Ханнанов, Р. Р. Проведение геодезических измерений на объектах Топарской ГРЭС / Р. Р. Ханнанов, А. В. Михнев, Е. П. Кулакова. – Текст : непосредственный // Труды университета. – Караганда : КарГУ, 2020. – № 3 (80). – С. 75–79.

64 Ханнанов, Р. Р. Трансформация систем координат местоположения золоотвала Топарской ГРЭС / Р. Р. Ханнанов. – Текст: непосредственный // Актуальные проблемы геодезии, картографии, кадастра, геоинформационных технологий, ра-

ционального земле- и природопользования : электрон. сб. тез. Междунар. науч.-техн. конф., Новополюцк, 9–10 июня 2022 г. – Новополюцк : Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2022. – С. 50–51.

65 Ханнанов, Р. Р. Учет влияния угловой рефракции на измеренные значения геопространственных данных / Р. Р. Ханнанов. – Текст : непосредственный // Естественные и технические науки. – Москва : Спутник, 2021. – № 9 (160) – С. 85–92.

66 Чугаев, Р. Р. Гидротехнические сооружения. Глухие плотины / Р. Р. Чугаев. – Москва : Агропромиздат, 1985. – 318 с. – Текст : непосредственный.

67 Шарафутдинова, А. А. Анализ возможностей применения наземного лазерного сканирования для мониторинга деформаций промышленных объектов / А. А. Шарафутдинова. – Текст : непосредственный // Современные проблемы инженерной геодезии : труды международной научно-практической конференции 14 ноября 2019 г., Санкт-Петербург ; под ред. проф. М. Я. Брыня. – Санкт-Петербург : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. – С. 146–149.

68 Шоломицкий, А. А. Анализ устойчивости дамбы золоотвала методом конечных элементов / А. А. Шоломицкий, Р. Р. Ханнанов. – Текст : непосредственный // Естественные и технические науки. – Москва : Спутник, 2023. – № 8 (183) – С. 101–109.

69 Шоломицкий, А. А. Анализ устойчивости дамбы золоотвала ТОО «Главная распределительная энергостанция Топар» / А. А. Шоломицкий, Р. Р. Ханнанов. – Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2023. – Т. 10, № 3. – С. 98–103.

70 Шоломицкий, А. А. Использование лазерного сканирования для мониторинга большепролетных сооружений / А. А. Шоломицкий, Е. К. Лагутина, Е. Л. Соболева. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 43–57.

71 Шоломицкий, А. А. Методика геодезического мониторинга за насыпными гидротехническими сооружениями / А. А. Шоломицкий, Р. Р. Ханнанов, М. С. Ту-

танова. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2023. – Т. 28, № 5. – С. 25–32.

72 Шоломицкий, А. А. Мониторинг состояния плотины Шерубай-Нурина водохранилища / А. А. Шоломицкий, Е. Н. Хмырова, Р. Р. Ханнанов. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск : сб. материалов в 9 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. № 1. – С. 265–271.

73 Application of exterior deformation monitoring of dams by DInSAR analysis using ALOS PALSAR / K. Honda et al. – Текст : непосредственный // Proc. IGARSS, 22–27 June 2012, Munich. – 2012. – P. 6649–6652. – DOI 10.1109/IGARSS.2012. 6352074.

74 Combining spaceborne SAR images with 3D point clouds for infrastructure monitoring applications / A. Anghel, G. Vasile, R. Boudon, G. d’Urso, A. Girard, D. Boldo, V. Bost. – Текст : непосредственный // ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. – 2016. – № 111. – P. 45–61. – DOI 10.1016/j.isprsjprs.2015.11.008.

75 Comparison between Differential SAR interferometry and ground measurements data in the displacement monitoring of the earth-dam of Conza della Campania (Italy) / D. Di Martire, R. Iglesias, D. Monells, G. Centolanza, S. Sica, M. Ramondini, L. Pagano, J. J. Mallorquí, D. Calcaterra. – Текст : непосредственный // Remote Sens. Environ. – 2014. – № 148. – P. 58–69.

76 Cranenbroeck, J. Van. State of the Art in Structural Geodetic Monitoring Solutions for Hydro Power Dams / J. Van Cranenbroeck. – Текст : электронный // Proc. FIG Working Week, Marrakech, Morocco. – 2011. – URL: https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2011/papers/ts01e/ts01e_vancranenbroeck_4763.pdf.

77 Deformation Monitoring Using Ground-Based SAR Data. / M. Crosetto, O. Monserrat, G. Luzi, M. Cuevas-Gonzales, N. Devanthéry. – Текст : непосредственный // Engineering Geology for Society and Territory. – 2015. – Vol. 5. – P. 137–140. – DOI 10.1007/978-3- 319-09048-1_27.

78 Ehrhart, M. Accurate Measurements with Image-Assisted Total Stations and Their Prerequisites / M. Ehrhart, W. Lienhart. – Текст : непосредственный // *Journal of Surveying Engineering*. – 2017. – № 143. – P. 04016024.

79 Gielsdorf, L. A concept for the calibration of terrestrial laser scanners / L. Gielsdorf, A. Rietdorf, F. Gruending. – Текст : электронный // *INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratislava, Slovakia, November, 2004.* – URL: https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/athens/papers/ts26/TS26_2_Gielsdorf_et_al.pdf.

80 Grenerczy, G. Persistent scatterer interferometry analysis of the embankment failure of a red mud reservoir using ENVISAT ASAR data / G. Grenerczy, U. Wegmüller. – Текст : непосредственный // *Nat. Hazards*. – 2011. – № 59. – P. 1047–1053. – DOI 10.1007/s11069-011-9816-6.

81 Investigative Procedures for Assessing Subsidence and Earth Fissure Risk for Dams and Levees. / K. C. Ferguson, M. L. Rucker, B. B. Panda, M. D. Greenslade. – Текст : непосредственный // *Engineering Geology for Society and Territory*. – 2015. – Vol. 6. – P. 695–699. – DOI 10.1007/978-3-319-09060-3_129.

82 Kalkan, Y. Geodetic deformation monitoring of Ataturk Dam in Turkey / Y. Kalkan. – Текст : непосредственный // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2014. – № 7. – P. 397–405/

83 Leica ScanStation 2. Руководство по применению. – Heerbrugg : Leica Geosystems AG, 2007. – 120 с. – Текст : непосредственный.

84 Measurement of Dam Deformations by Terrestrial Interferometric Techniques / M. Alba, G. Bernardini, A. Giussani, P. P. Ricci, F. Roncoroni, M. Scaioni, P. Valgoi, K. Zhang. – Текст : непосредственный // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* – 2008. – 37(B1). – P. 133–139.

85 Mills, J. Geomatics Techniques for Structural Surveying / J. Mills, D. Barber. – Текст : электронный // *Journal of Surveying Engineering*. – 2004. – URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2004\)130:2\(56\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2004)130:2(56)).

86 Monitoring an earthfill dam using differential SAR interferometry: La Pedrera dam, Alicante, Spain. / R. Tomás, M. Cano, J. Garcia-Barba, F. Vicente, G. Herrera, J. M. Lopez-Sanchez, J. J. Mallorquí. – Текст : непосредственный // Eng. Geol. – 2013. – № 137. – P. 21–32. – DOI 10.1016/j.enggeo.2013.01.022.

87 Monserrat, O. A Review of Ground-based SAR Interferometry for Deformation Measurement / O. Monserrat, M. Crosetto, G. Luzi. – Текст : непосредственный // ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. – 2014. – № 93. – P. 40–48. – DOI 10.1016/j.isprsjprs.2014.04.001.

88 Observing Dam's Movements with Spaceborne SAR Interferometry / M. Lazecky, D. Perissin, Z. Wang, L. Ling, Y. Qin, P. Lollino. – Текст : непосредственный // Engineering Geology for Society and Territory. – 2015. – Vol. 5. – P. 131–136. – DOI 10.1007/978-3-319-09048-1_26.

89 Persistent Scatterer Interferometry: a review / M. Crosetto, O. Monserrat, M. Cuevas-Gonzales, N. Devanthéry, B. Crippa. – Текст : электронный // ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. – 2015. – URL: https://www.researchgate.net/publication/284244843_Persistent_Scatterer_Interferometry_A_review.

90 Pottmann, H. Simultaneous registration of multiple views of a 3D object / H. Pottmann, S. Leopoldseder, M. Hofer. – Текст : электронный // Photogrammetric Computer Vision ISPRS Commission III. – 2002. – URL: https://www.researchgate.net/publication/2840842_Simultaneous_Registration_Of_Multiple_Views_Of_A_3d_Object.

91 Prediction, monitoring, and interpretation of dam leakage flow via adaptive kernel extreme learning machine / S. Chen, C. Gu, C. Lin, Y. Wang, M. A. Hariri-Ardebili. – Текст : непосредственный // Measurement. – 2020. – № 166. – P. 108161.

92 Pulli, K. Multiview registration for large data sets / K. Pulli. – Текст : электронный // Proceedings 2nd international conference on 3D Digital Imaging and Modelling, Ottawa, 1999. – URL: <https://graphics.stanford.edu/papers/pulli-3dim99/3dim99.pdf>.

93 SAR interferometry for structural changes detection: a demonstration test on a dam / D. Tarchi, H. Rudolf, G. Luzi, L. Chiarantini, P. Coppo, A. J. Sieberg. – Текст : непосредственный // Proc. IGARSS '99. – 28 June – 2 July 1999, Hamburg, – Vol. 3, P. 1522–1524.

94 Scherer, M. From the Conventional Total Station to the Prospective Image Assisted Photogrammetric Scanning Total Station: Comprehensive Review / M. Scherer, J. L. Lerma. – Текст : непосредственный // *Journal of Surveying Engineering*. – 2009. – № 135. – P. 173–185.

95 Slope Instability Detection Along the National 7 and the Potrerillos Dam Reservoir, Argentina, Using the Small-Baseline / C. Michaud, V. Baumann, M.-H. Derron, M. Jaboyedoff, T. R. Lauknes. – Текст : непосредственный // *SAR Technique. Engineering Geology for Society and Territory*. – 2015. – Vol. 2. – P. 285–292. – DOI 10.1007/978-3-319-09057-3_44.

96 Structural monitoring of a large dam by terrestrial laser scanning / M. Alba, L. Fregonese, F. Prandi, M. Scaioni, P. Valgoi. – Текст : непосредственный // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* – 2006. – № 36(5). – 6 p.

97 Time series analysis of InSAR data: Methods and trends / B. Osmanoglu, F. Sunar, S. Wdowinski, E. Cabral-Cano. – Текст : электронный // *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* – 2015. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271615002269?via%3Dihub>.

98 Wagner, A. A new approach for geo-monitoring using modern total stations and RGB+D images / A. Wagner. – Текст : непосредственный // *Measurement*. – 2016. – № 82. – P. 64–74.

99 Xing, C. Research on the environmental effects of GB-SAR for dam monitoring / C. Xing, J. J. Huang, X. Q. Han. – Текст : непосредственный // *Advanc. Mater. Res.* – 2014. – P. 392–397.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСА ДАМБЫ МЕТОДОМ
КРУГЛОЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ

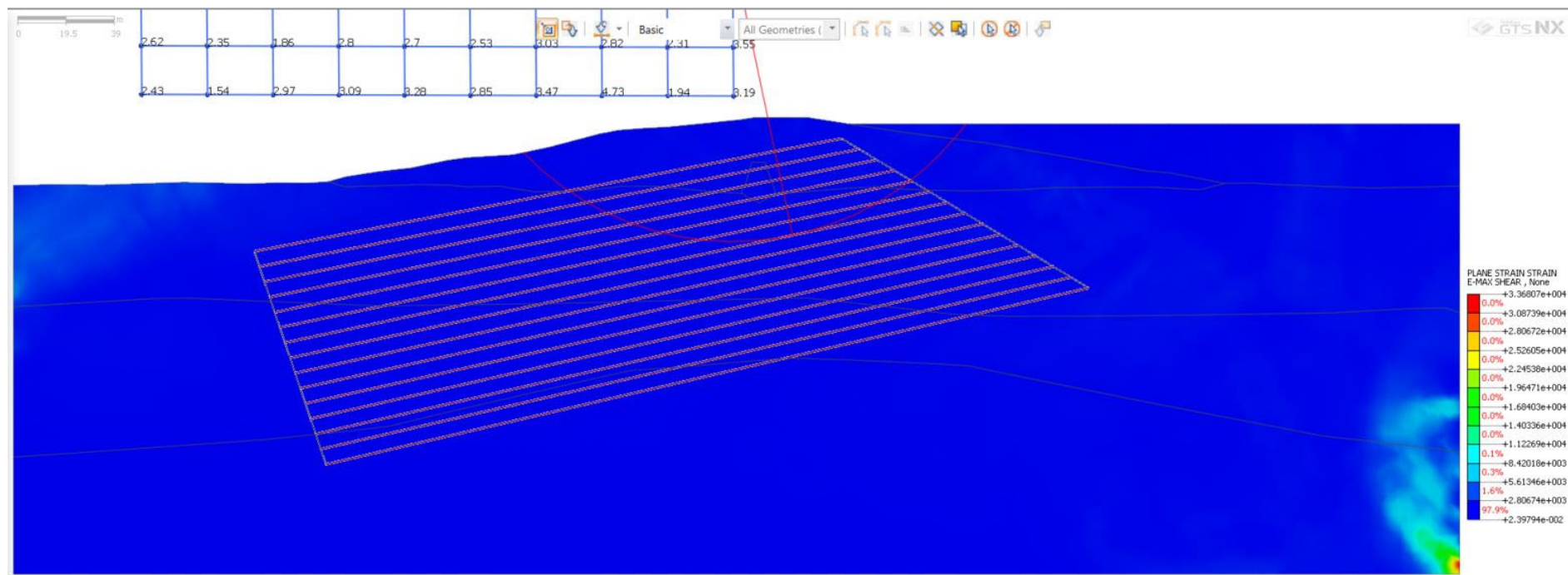


Рисунок А.1 – Максимальная поверхность скольжения

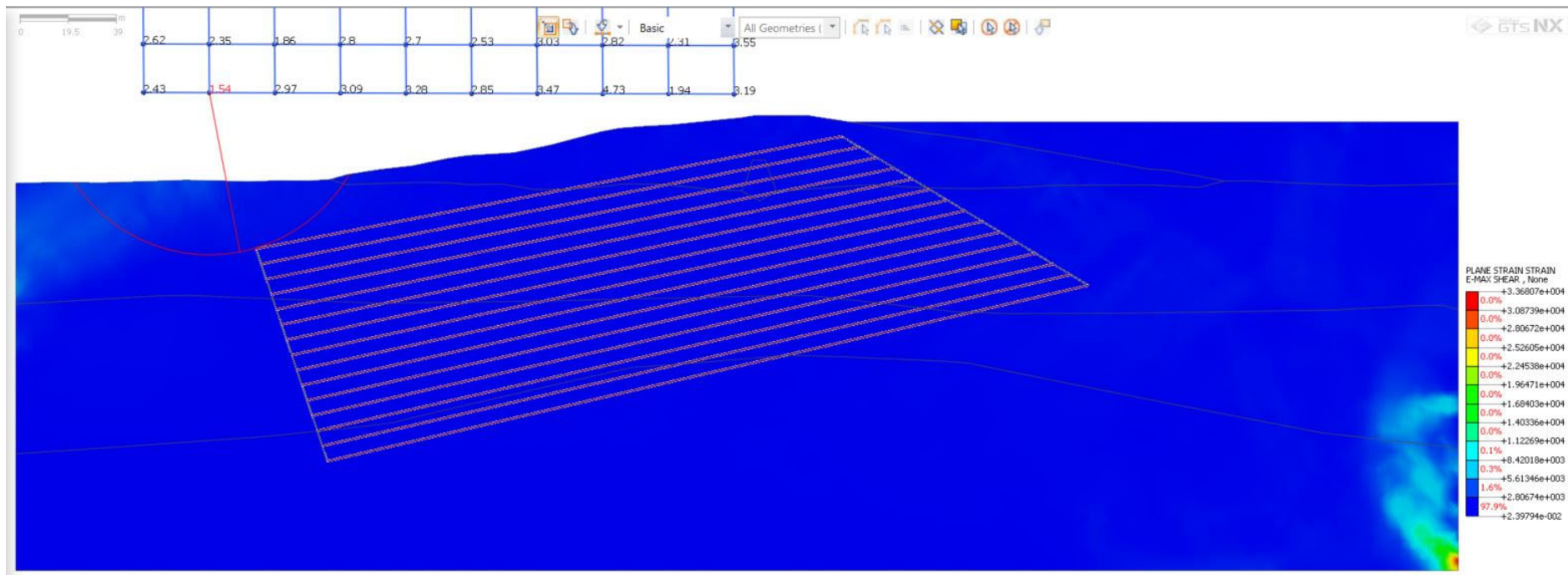


Рисунок А.2 – Минимальная поверхность скольжения

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ И СТЕПЕНИ НАСЫЩЕНИЯ ВОДОЙ ТЕЛА ДАМБЫ

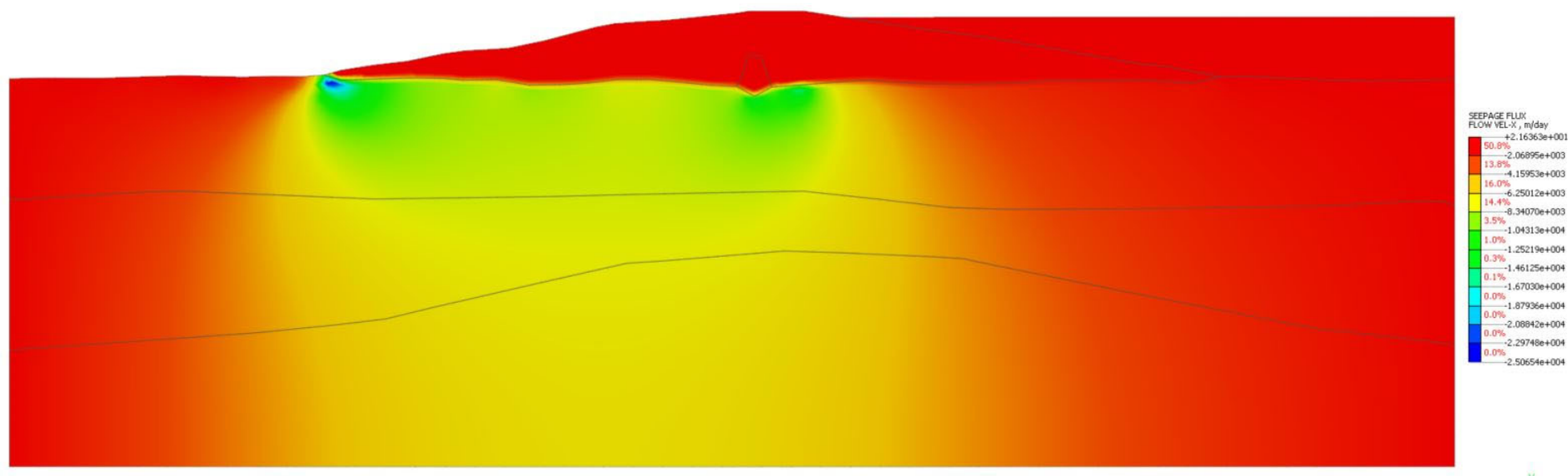


Рисунок Б.1 – Участки изменения скорости фильтрационных потоков в основании дамбы

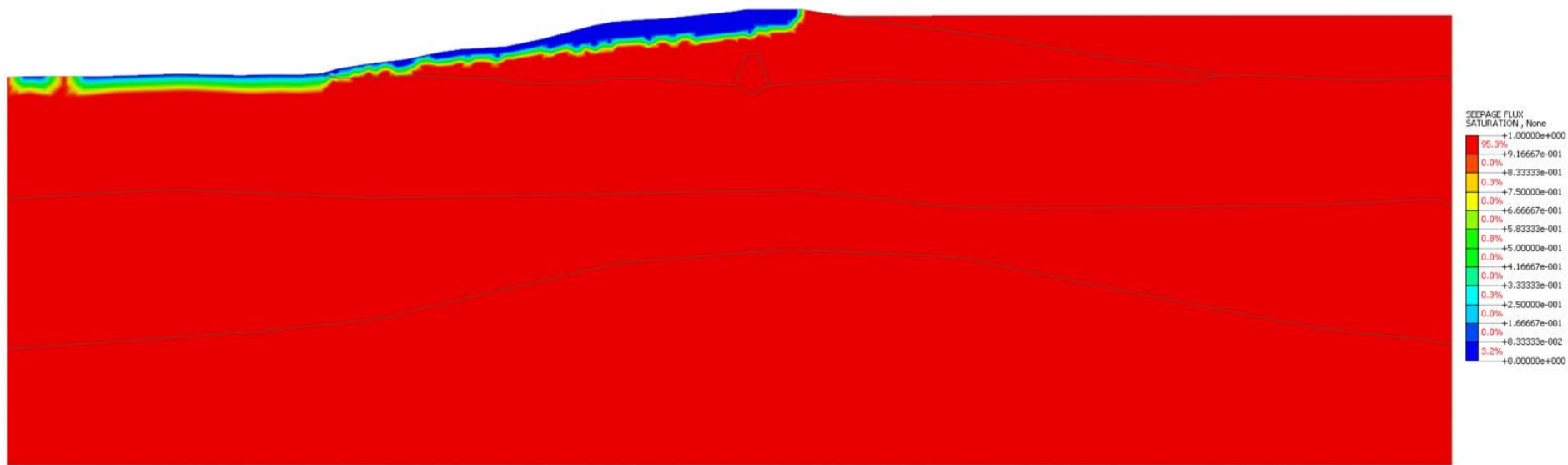


Рисунок Б.2 – Схема изменения степени насыщения тела дамбы и ее основания водой

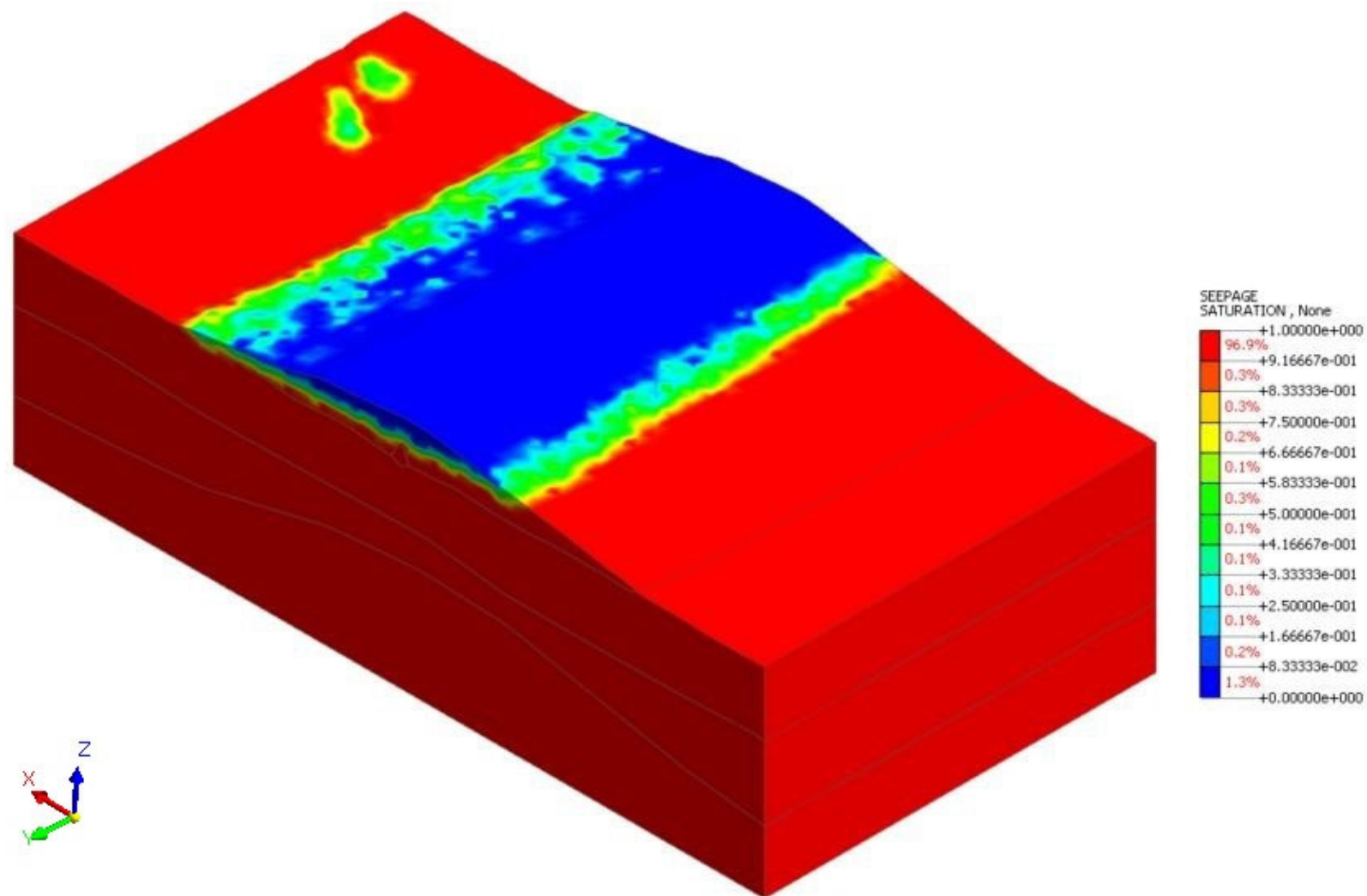


Рисунок Б.3 – Трехмерная модель тела дамбы и ее основания, показывающая изменения степени насыщения водой

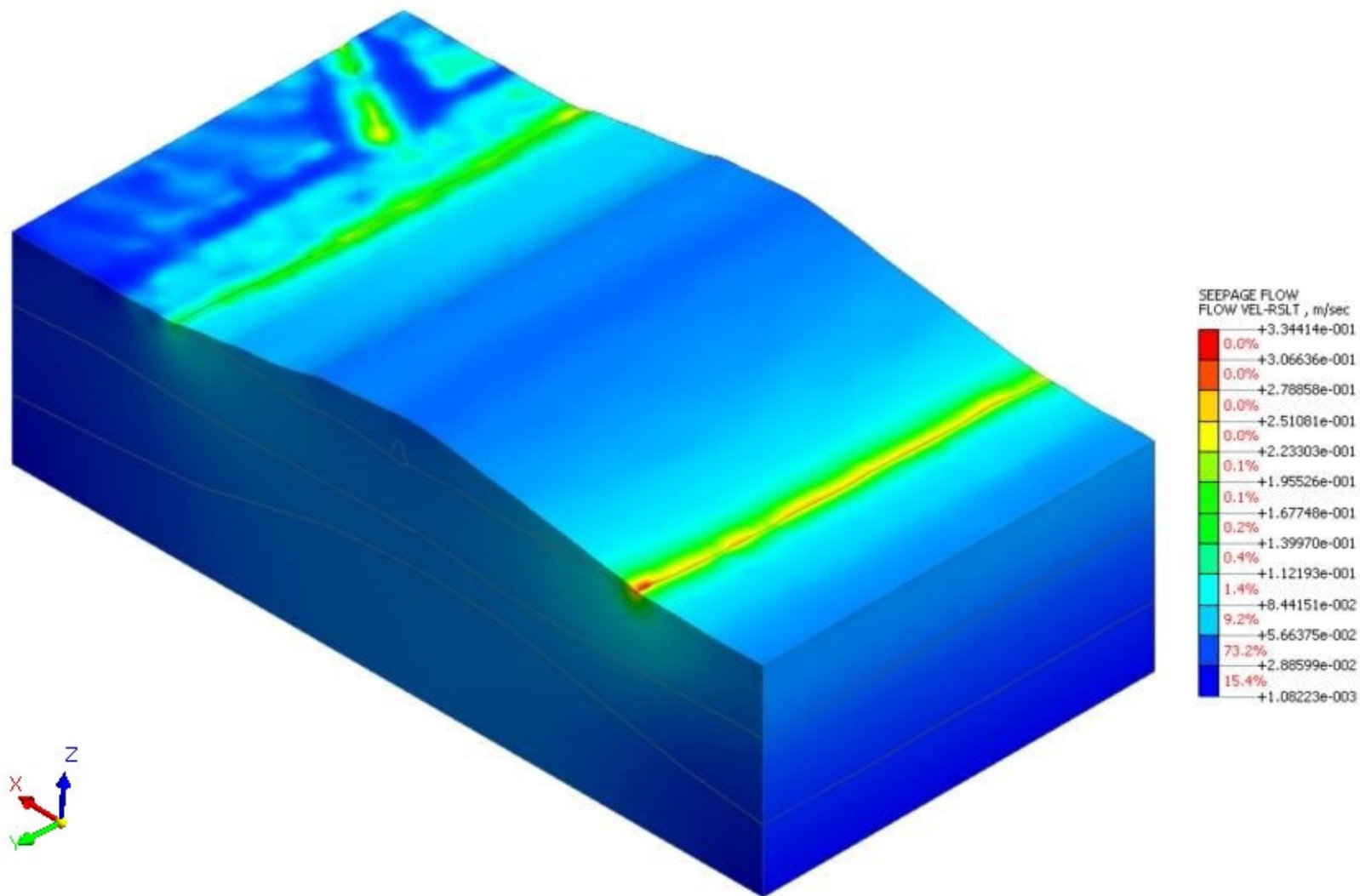


Рисунок Б.4 – Расчет результирующей скорости фильтрационных потоков дамбы

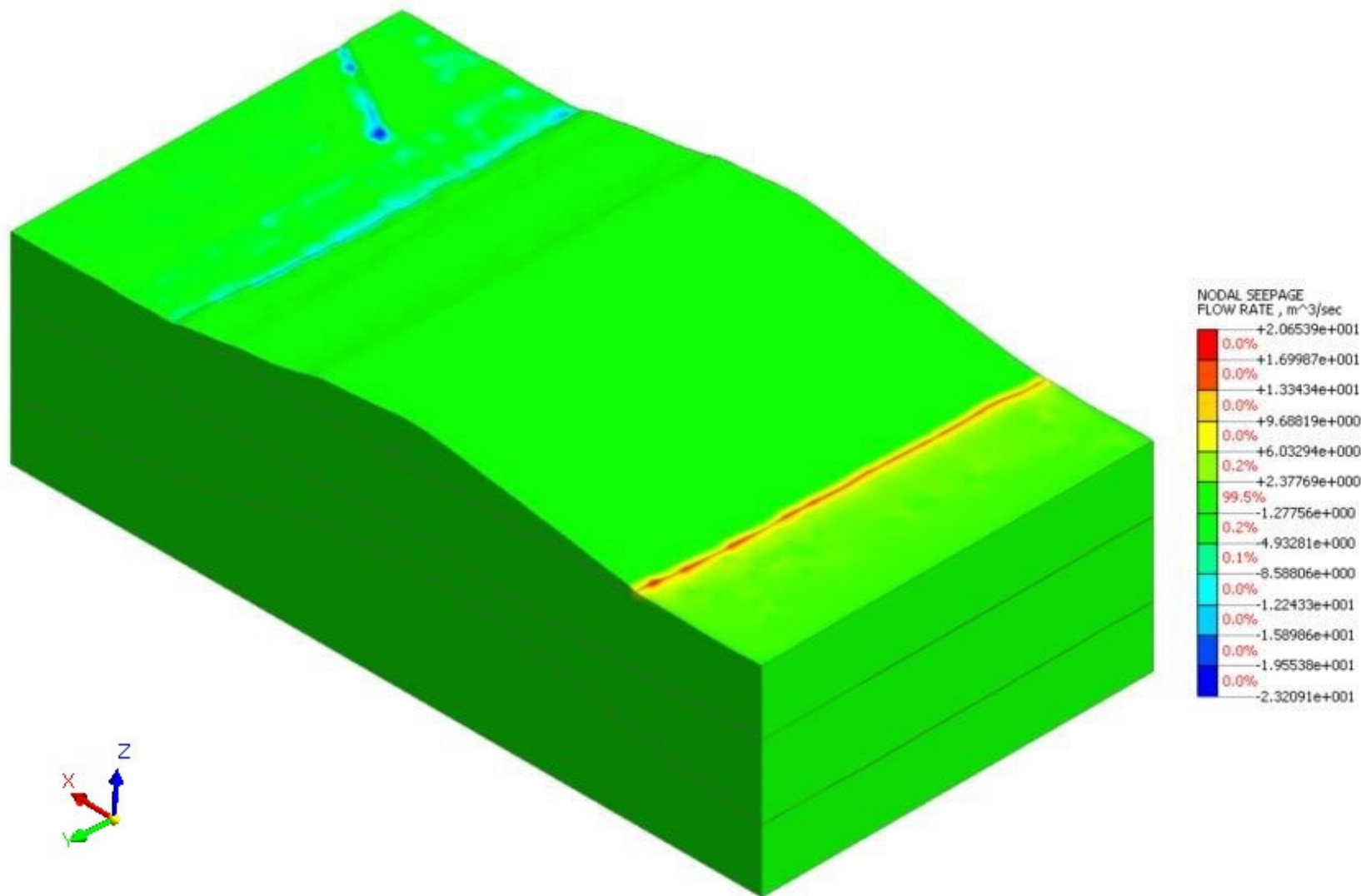


Рисунок Б.5 – Модель определения линии просачивания фильтрационных потоков

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

СТРУКТУРНОЕ СТРОЕНИЕ ДАМБЫ И ОСНОВАНИЯ

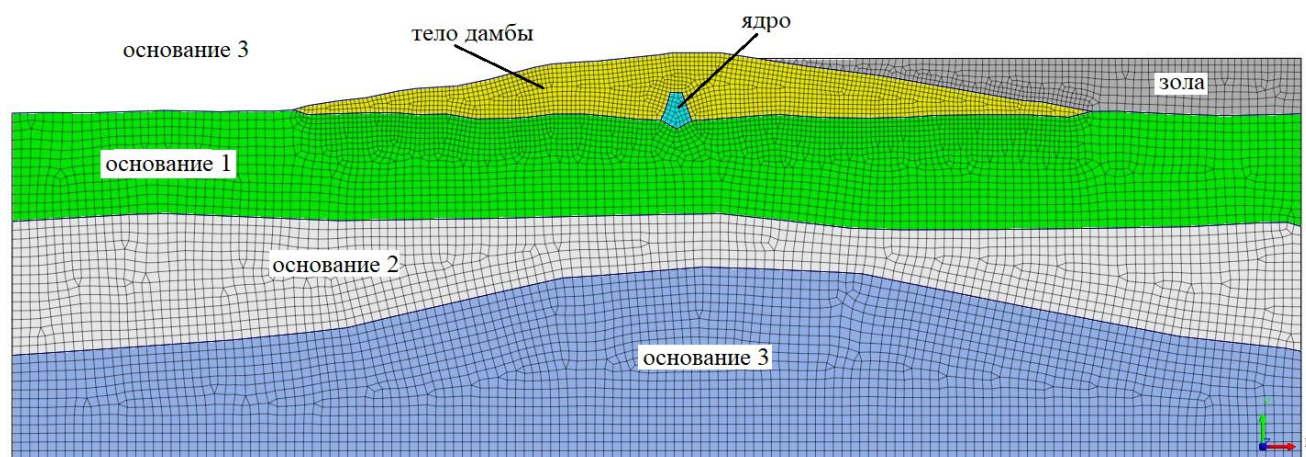


Рисунок В.1 – Строение дамбы

Таблица В.1 – Физико-механические свойства грунтов

Строение тела дамбы и основания	Наименование грунта	Модуль упругости (E), кН/м ²	Коэффициент Пуассона (ν)
Тело дамбы	Суглинок	25 000	0,3
Ядро	Глина	35 000	0,45
Основание 1	Песок	33 000	0,3
Основание 2	Глина красно-бурая	38 000	0,4
Основание 3	Порфирит	43 000	0,4

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

ЭФФЕКТИВНЫЕ ОБЩИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ОБЪЕКТА И МАССИВА

